
MASTERARBEIT

Herr
Daniel Sella

**Konzepterstellung zur techni-
schen Umsetzung einer in der
Laseroptik integrierbaren, au-
tomatischen Fokusabstand-
messung**

Mittweida, 2017

MASTERARBEIT

Konzepterstellung zur technischen Umsetzung einer in der Laseroptik integrierbaren, automatischen Fokusabstandsmessung

Autor:
Herr

Daniel Sella

Studiengang:
Lasertechnik

Seminargruppe:
LT15w1-M

Hochschulbetreuer:
Prof. Dr. rer. nat. Andreas Fischer

Betrieblicher Betreuer:
Dipl.-Ing. SFI Peter Leipe

Einreichung:
Mittweida, 07.12.2017

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2017

MASTER THESIS

Conceptual design for the technical implementation of an in the laser optics integrable, automatically focus distance measurement

author:

Mr.

Daniel Sella

course of studies:

Laser Technologies

seminar group:

LT15w1-M

university advisor:

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Fischer

company advisor:

Dipl.-Ing. SFI Peter Leipe

submission:

Mittweida, 07.12.2017

defense/evaluation:

Mittweida, 2017

Bibliografische Beschreibung:

Sella, Daniel

Konzepterstellung zur technischen Umsetzung einer, in der Laseroptik integrierbaren, automatischen Fokusabstandmessung. - 2017. – 16 S., 83 S., 22 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Masterarbeit, 2017

Referat:

Ein auf Triangulation oder Laufzeitmessung beruhender Laserentfernungsmesser kann dazu benutzt werden, den Fokusabstand an einem Laserbearbeitungskopf auszumessen. Jedoch muss überprüft werden, ob es möglich ist, die Messdaten so zu verarbeiten, dass durch diese die Achsen der Lasersteuerung die geeignete Einstellung annehmen. Außerdem sollte die Stromversorgung nicht per Batterie erfolgen. Auch die Möglichkeit, das Messgerät für die Einstellung der Fokusslage auf die Probenoberfläche zu nullen, soll realisiert werden.

Abstract:

A laser distance meter basing on triangulation or time of flight measurement can be used to measure the focus distance at a laser machining head. However, it must be checked whether it is possible to handle the measurement data in such a way that the axes of the laser control adopt the suitable adjustment. In addition, the power supply should not be done by battery. Also, the possibility to zeroize the measurement device for the adjustment of the focus position on the sample surface should be realized.

„Machbarkeitsuntersuchung zur automatischen Fokusabstandsmessung“

Aufgabenstellung für:
Herr Daniel Sella
Geboren am 13.05.1994

Die Laserbearbeitung von Werkstücken erfährt in vielfältigen Branchen der deutschen, europäischen und internationalen Industrie verstärkte Akzeptanz und Verbreitung. Angespornt durch die hochqualitativen Laseranlagensysteme, welche für kleine Stückzahlen mit hohem Variantenreichtum bis hin zur Massenfertigung in der 24/7 Produktion eingesetzt werden, werden die Laserquellen durch den Wettbewerbsdruck immer günstiger. Dadurch werden Laseranlagen für Industriebereiche interessant, welche bis vor ein paar Jahren aus Invest- sowie TCO-Sicht nicht rentabel gewesen wären. Dennoch sind zur Herstellung unterschiedlichster Werkstücke die TCO möglichst gering zu halten und alle betriebswirtschaftlichen Möglichkeiten, insbesondere von Laseranlagen, auszuschöpfen. Im Rahmen dieser Masterarbeit soll betrachtet werden, welche Prinzipien zur Fokusabstandsmessung möglich sind und welche, eventuell vorhandenen, Systeme dafür eingesetzt werden können. Diese technische Recherche und Auswahl soll unter der wirtschaftlichen Randbedingung eines maximalen Selbstkostenpreises von 3000 Euro durchgeführt werden. Da es auf dem Markt bereits derartige Lösungen mit erheblich höheren Anschaffungskosten gibt, ist eine Fokusabstandsmessung in diesem, niedrigeren Preissegment von höchstem Interesse. Die technische Auswahl soll aufbauend auf das bereits zum selben Thema abgeschlossene Praxismodul durchgeführt werden. Des Weiteren ist ein theoretisches Konzept zur Anzeige, Bedienung und Integrierbarkeit des Messsensors zu erarbeiten. Dabei soll auch die Kalibrierbarkeit des Messmittels betrachtet werden. Darauf aufbauend soll ein passender Messsensor beschafft und integriert werden. Bei der Integration ist darauf zu achten, dass es zu keinerlei Beeinträchtigungen der vorhandenen Funktionalitäten des Laserkopfes kommt. Im nächsten Schritt sollen die theoretischen Betrachtungen an einem Demonstrator in der Praxis umgesetzt und mit Versuchsreihen hinterlegt werden. Abschließend soll die Arbeit zusammengefasst werden und ein Ausblick erarbeitet werden, der Empfehlungen für die weitere Entwicklung des Systems gibt.

Im Einzelnen sind, aufbauend auf das Forschungsmodul, folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

1. Recherche zur Anwendbarkeit optischer Fokuslagemessung
2. Technische und kommerzielle Auswahl eines optischen Messprinzips, aufbauend auf das bereits absolvierte Forschungsmodul
3. Erarbeitung eines technischen Konzeptes zur Entwicklung einer integrierbaren, optischen Fokuslagenbestimmung
4. Entwicklung eines Bedienkonzeptes für eine Fokuslagenbestimmung
5. Recherche zu einsetzbaren, bereits auf dem Markt vorhandenen Equipment
6. Auswahl und Beschaffung des aus dem Konzept und der Recherche hervorgegangenen Equipments
7. Konstruktion und Fertigung der mechanischen Bauteile zur Integration eines Messkopfes
8. Integration und Inbetriebnahme des Messkopfes
9. Experimentelle Untersuchungen zu Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Messkopfes
10. Zusammenfassung und Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse und der weiterzuführenden Entwicklungsarbeit

Während der Bearbeitung sind Detaillierungen mit dem Betreuer abzustimmen.

Betreuer:

Dipl.-Ing. SFI Peter Leipe
Prof. Dr. rer. nat. Andreas Fischer

SITEC Industrietechnologie GmbH
Bornaer Straße 192
09114 Chemnitz

Sperrvermerk

Diese Masterarbeit basiert auf internen und vertraulichen Daten des Unternehmens SI-TEC Industrietechnologie GmbH. Sie darf Dritten, mit Ausnahme des betreuenden Dozenten und befugten Mitgliedern des Prüfungsausschusses nicht zugänglich gemacht werden. Eine Vervielfältigung und Veröffentlichung der Masterarbeit ohne ausdrückliche Genehmigung, auch in Auszügen, ist nicht erlaubt.

Vorwort

Ein wesentlicher zeitlich einschränkender Faktor bei der produktiven Laserbearbeitung ist die Fokussuche, da diese oft aufwändig, jedoch notwendig ist. Wenn diese automatisiert wird, ist die Zeitersparnis also signifikant. Die ersten Schritte wurden durch die Auswahl eines optischen Abstandsmessverfahrens und eines Konzeptes zur Integration dieses an einen Laserbearbeitungskopf bereits vor Beginn dieser Arbeit erledigt. Allerdings ist das bisher aufgebaute System noch in einigen Punkten ausbaufähig, z. B. in Bezug auf die Genauigkeit oder die Möglichkeit, den Messwert zu nullen. Ebenfalls noch notwendig ist die Verbindung zur Lasersteuerung, die es ermöglicht, dass die Achsen automatisch an die Stelle verfahren, dass die Probenoberfläche im Fokus liegt. Im Folgenden wird ein Messsystem aufgebaut, das diese Anforderungen erfüllt. Die Eigenschaften dieses Messsystems werden experimentell an einem Demonstrator überprüft.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gebührt meinen beiden Betreuern Dipl.-Ing. Peter Leipe und Prof. Dr. Andreas Fischer. Ebenfalls herzlich danken möchte ich Frank Faust für die Hinweise zu den technischen Zeichnungen und Robert Wollgramm für die Hinweise zur Konstruktion der mechanischen Vorrichtungen. Ein weiterer herzlicher Dank gebührt Volker Schettler und Matthias Berghold für die Hilfestellung beim elektrischen Anschluss der Entfernungsmessgeräte. Christian Endisch gebührt ein herzlicher Dank für die Tipps zur Umsetzung der Messversuche. Für die Hilfe bei der Vorbereitung der Verteidigung möchte ich Christoph Stoye herzlich danken. Auch meinen Eltern und meiner Schwester gebührt ein herzlicher Dank für die moralische Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	XII
Formelzeichen.....	XIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
3 Theoretische Grundlagen.....	6
3.1 Abstandsmessverfahren	6
3.1.1 Lasertriangulation.....	6
3.1.2 Laufzeitmessung	7
3.2 Linsenoptik	7
3.3 Prozesse beim Auftreffen von Strahlung auf einen Körper.....	8
3.3.1 Streuung und diffuse Reflexion.....	8
3.3.2 Reflexion und Transmission	9
3.3.3 Absorption	12
3.4 Messgenauigkeitsbetrachtungen	13
3.4.1 Fehlerarten.....	13
3.4.2 Kenngrößen	15
4 Material und Methoden	17
4.1 Vorstellung der Anlagentechnik	17
4.2 Bisherige Lösung.....	19
4.3 Auswahl des Messgerätes.....	21
4.3.1 Randbedingungen	21
4.3.2 Variantenvergleich.....	22
4.4 Versuchsaufbau und Integration des Messgeräts	25
4.4.1 Mechanische Integration	25
4.4.2 Steuerungstechnische Integration	30

5 Ergebnisse und Diskussion	34
5.1 Ergebnisse für die Integration	34
5.2 Messergebnisse	35
5.2.1 Erkennbarkeit der Entfernungen	35
5.2.2 Kennlinienaufnahme	38
5.2.3 Standardabweichung bei wiederholter Messung	45
5.2.4 Einfluss der Oberfläche	52
5.2.5 Winkelabhängigkeit	54
6 Änderung des Messgeräts	56
6.1 Variantenvergleich	56
6.2 Messgerät 1: ODKL 96B	57
6.3 Messgerät 2: ODSIL 96B	61
6.3.1 Grundsätzliches Verhalten	61
6.3.2 Überprüfung der Messgenauigkeit	64
6.3.3 Einfluss der Oberfläche	68
6.3.4 Winkelabhängigkeit	69
6.4 Messgerät 3: BOD 23K-LA01-S92	70
6.5 Messgerät 4: OY1P303P0102	72
6.5.1 Bedingungen und Beobachtungen	72
6.5.2 Kennlinienaufnahme für verschiedene Oberflächen	73
6.5.3 Aufnahme der Standardabweichung	77
6.5.4 Einfluss des Winkels	78
7 Zusammenfassung und Ausblick	80
7.1 Zusammenfassung	80
7.2 Ausblick	82
Anlagen	XIV
Literatur- und Quellenverzeichnis	XXXVI
Selbstständigkeitserklärung	XXXIX

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Tab.	Tabelle
FK	Fresnel-Koeffizient
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)
BEO	Bearbeitungsoptik (Bezeichnung und Abkürzung bei der Firma Trumpf)
cw	continuous wave (kontinuierliche Welle)
CCD	Charged Coupled Device (ladungsträgergekoppelte Schaltung)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (komplementär Metall, Oxid, Halbleiter)
opt.	Optimiert
LS	Laser Station
LWS	Laser Work Station
GLM	generalisierte lineare Modelle

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizze bisheriger Versuchsaufbau, nach von Trumpf bereitgestellter Zeichnung	2
Abbildung 2:	Autofokussystem, nach [5]	5
Abbildung 3:	Autofokus durch Entfernungsmesser, nicht koaxial, nach [6]	5
Abbildung 4:	Autofokus durch Entfernungsmesser, koaxial, nach [6].....	5
Abbildung 5:	Schema Lasertriangulation [7]	6
Abbildung 6:	diffuse Reflexion [10]	9
Abbildung 7:	Reflexionsgrad in Abhängigkeit von Schichtdicke und Brechzahl der Beschichtung.....	10
Abbildung 8:	Beispiele für Brechzahlverläufe an Mehrschichtsystemen ($\lambda/4$ -Schichten hoch-niedrig mit a) zwei, b) sechs Doppelschichten und c) zwei Doppelschichten mit zusätzlicher hochbrechender Schicht) [9] ..	11
Abbildung 9:	wellenlängenabhängige Absorptionsgrade verschiedener Metalle [11]	12
Abbildung 10:	Proportionalitätsfehler [12].....	13
Abbildung 11:	Nullpunktfehler [12]	14
Abbildung 12:	Nichtlinearität [12].....	14
Abbildung 13:	Hysterese [13]	15
Abbildung 14:	Auflösung [15]	16
Abbildung 15:	Modell des Bearbeitungskopfes der Laseranlage SYSLAS	17
Abbildung 16:	Schema des 0°- (links) und des 90°-Aufbaus (rechts) [16].....	18
Abbildung 17:	Skizze des 2 x 90°-Aufbaus [17].....	18

Abbildung 18:	Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Messlaserstrahlung bei GLM 30 [19]	19
Abbildung 19:	Modell der mechanischen Befestigung des Messgeräts am Bearbeitungskopf	20
Abbildung 20:	Messgerät LAS-T5 [21]	21
Abbildung 21:	Kameraanschluss und Schnittstelle für Sensorik, aus Vorgängervariante von [18]	25
Abbildung 22:	Modell einer Vorrichtung zur mechanischen Integration (senkrechte Einstrahlung)	26
Abbildung 23:	Strahlungsemission senkrechte Einstrahlung	27
Abbildung 24:	Modell der Vorrichtung zur Schrägstellung des Messgeräts (Seiteneinstrahlung)	27
Abbildung 25:	Strahlungsemission Seiteneinstrahlung	28
Abbildung 26:	Modell der mechanischen Befestigung der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung am Bearbeitungskopf	28
Abbildung 27:	Modell der Vorrichtung zur Schrägstellung des Messgerätes optimiert	29
Abbildung 28:	Strahlungsemission Seiteneinstrahlung optimiert	29
Abbildung 29:	Ausgabe für Steuerung der Laserachsen nach Erweiterung	32
Abbildung 30:	Versuchsaufbau an der Laseranlage mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung	34
Abbildung 31:	Versuchsaufbau an der Laseranlage mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung	34
Abbildung 32:	Simulation der Brechung der Messlaserstrahlung	36
Abbildung 33:	Schema für fehlende Koaxialität	37

Abbildung 34:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	39
Abbildung 35:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	39
Abbildung 36:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	40
Abbildung 37:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	41
Abbildung 38:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	41
Abbildung 39:	Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	42
Abbildung 40:	exponentielle Kennlinie an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	43
Abbildung 41:	Kennlinie als Potenzfunktion an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote).....	44
Abbildung 42:	polynomische Kennlinie vierten Grades an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)	44
Abbildung 43:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung	45

Abbildung 44:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung	46
Abbildung 45:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung	46
Abbildung 46:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung	47
Abbildung 47:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung	47
Abbildung 48:	Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung	48
Abbildung 49:	Standardabweichung der Spannung bei Seiteneinstrahlung an der Laseranlage	50
Abbildung 50:	Standardabweichung der Spannung bei senkrechter Einstrahlung an der Laseranlage	50
Abbildung 51:	Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche am Demonstrator	52
Abbildung 52:	Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche an der Laseranlage	53
Abbildung 53:	Werkstück zur Winkelmessung.....	54
Abbildung 54:	Tiefe in Abhängigkeit vom Winkel in Verfahrriichtung	54
Abbildung 55:	Standardabweichung in Abhängigkeit vom Winkel	55
Abbildung 56:	Ausgabefenster für Konfigurationssoftware des ODKL 96B.....	58

Abbildung 57: Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot)	64
Abbildung 58: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot).....	65
Abbildung 59: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung in Abhängigkeit von der Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot).....	65
Abbildung 60: Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)	66
Abbildung 61: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot).....	67
Abbildung 62: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung in Abhängigkeit von der Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot).....	67
Abbildung 63: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche bei ODSIL 96B.....	68
Abbildung 64: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche bei ODSIL 96B ohne Ausreißer.....	69
Abbildung 65: Tiefe in Abhängigkeit vom Winkel in Fahrtrichtung bei Messung mit ODSIL 96B	69
Abbildung 66: Standardabweichung in Abhängigkeit vom Winkel bei Messung mit ODSIL 96B	70
Abbildung 67: Form des Körpers zur Positionskorrektur	73

Abbildung 68:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Stahl mit Fokusabstand (rot)	74
Abbildung 69:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit Fokusabstand (rot)	74
Abbildung 70:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Kunststoff (hell) mit Fokusabstand (rot)	75
Abbildung 71:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Kupfer mit Fokusabstand (rot)	75
Abbildung 72:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)	76
Abbildung 73:	Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit einer Brennweite von 200 mm ohne Schutzglas mit Fokusabstand (rot)	77
Abbildung 74:	Aufnahme der Standardabweichung bei OY1P303P0102	77
Abbildung 75:	Aufnahme der Standardabweichung bei OY1P303P0102 bei einer Brennweite von 200 mm.....	78
Abbildung 76:	Winkelabhängigkeit bei OY1P303P0102	79
Abbildung 77:	Messgerät OM70 [33].....	XIV
Abbildung 78:	Messgerät optoNCDT 1420 [34]	XV
Abbildung 79:	Messgerät OY1P303P0102 [29]	XV
Abbildung 80:	Messgerät BOD 23K-LA01-S92 [35].....	XVI
Abbildung 81:	Messgerät ODKL 96B bzw. ODSIL 96B [36]	XVI
Abbildung 82:	TRUE-RMS-Messgerät UT61D mit USB [26].....	XVII
Abbildung 83:	TRMS-Multimeter Ironmeter [27]	XVII
Abbildung 84:	Auto-Ranging Multimeter PCE-EM886 [28]	XVII

Abbildung 85:	Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlagen LS 64 C und LWS-P1000 (Nummer oben: firmeneigene Nummerierung der Firma Trumpf), Quelle: Trumpf	XVIII
Abbildung 86:	Transmissionskurve Objektiv der Laseranlagen LS 64 C, LWS-P1000, LWS-C, LS 108 CI und SYSLAS, Quelle: Trumpf	XVIII
Abbildung 87:	Transmissionskurve Schutzglas der Laseranlagen LS 64 C, LWS-C, LS 108 CI und LWS-P1000, Quelle: Trumpf.....	XIX
Abbildung 88:	Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlage SYSLAS, Quelle: Trumpf.....	XIX
Abbildung 89:	Transmissionskurve Schutzglas SYSLAS, Quelle: Trumpf.....	XX
Abbildung 90:	Transmissionskurve Kantenfilter der Laseranlagen LWS-C und LS 108 CI, Quelle: Trumpf	XX
Abbildung 91:	Transmissionskurve erster Teilerspiegel der Laseranlage LS 108 CI, Quelle: Trumpf.....	XXI
Abbildung 92:	Transmissionskurve zweiter Teilerspiegel der Laseranlage LS 108 CI, Quelle: Trumpf.....	XXI
Abbildung 93:	Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf	XXII
Abbildung 94:	Transmissionskurve Teilerspiegel Sensorarm der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf.....	XXII
Abbildung 95:	Transmissionskurve Objektiv der Laseranlagen LWS-DM4 -und DM5, Quelle: Trumpf.....	XXIII
Abbildung 96:	Transmissionskurve Schutzglas der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf	XXIII
Abbildung 97:	Technische Zeichnung Grundplatte Seiteneinstrahlung	XXIV
Abbildung 98:	Technische Zeichnung Halterung	XXV

Abbildung 99: Technische Zeichnung Auflageplatte	XXVI
Abbildung 100: Technische Zeichnung Wandansatz	XXVII
Abbildung 101: Technische Zeichnung Winkelstück.....	XXVIII
Abbildung 102: Technische Zeichnung Grundplatte senkrechte Einstrahlung	XXIX
Abbildung 103: Technische Zeichnung Unterplatte	XXX
Abbildung 104: Technische Zeichnung Befestigungsplatte.....	XXXI
Abbildung 105: Technische Zeichnung Halterung optimiert.....	XXXII
Abbildung 106: Technische Zeichnung Auflageplatte optimiert.....	XXXIII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Brennweiten der Bearbeitungsköpfe der verschiedenen Laseranlagen	18
Tabelle 2:	Technische Daten GLM 30 [19]	19
Tabelle 3:	Technische Daten OM70 [22]	22
Tabelle 4:	Technische Daten LAS-T5-500 [21] [23]	23
Tabelle 5:	Technische Daten optoNCDT 1420-500 [24]	23
Tabelle 6:	Gegenüberstellung Kosten-Messgenauigkeit	24
Tabelle 7:	berechnete Intensitätsverluste	24
Tabelle 8:	TRUE-RMS-Messgerät UT61D mit USB [26]	30
Tabelle 9:	TRMS-Multimeter Ironmeter [27]	31
Tabelle 10:	Auto-Ranging Multimeter PCE-EM886 [28]	31
Tabelle 11:	Technische Daten OY1P303P0102 [29]	56
Tabelle 12:	Technische Daten BOD 23K-LA01-S92 [30]	56
Tabelle 13:	Technische Daten ODKL 96B [31]	56
Tabelle 14:	Technische Daten ODSIL 96B [32]	57
Tabelle 15:	Kosten-Nutzen-Verhältnis Laufzeitmessgeräte	57
Tabelle 16:	Unterschied des optischen Weges durch Transmission durch Glas...	60
Tabelle 17:	berechnete Intensitätsverluste ODSIL 96B	62

Formelzeichen

Formelzeichen	Erklärung
r_s	FK der Reflexion für senkrecht polarisierte Strahlung
r_p	FK der Reflexion für parallel polarisierte Strahlung
t_s	FK der Transmission für senkrecht polarisierte Strahlung
t_p	FK der Transmission für parallel polarisierte Strahlung
n	Brechungsindex im EinfallsmEDIUM oder Anzahl an Messungen
n'	Brechungsindex im Transmissionsmedium
ε	Einfallswinkel im EinfallsmEDIUM
ε'	Einfallswinkel im Transmissionsmedium
λ	Wellenlänge
m_L	Steigung der Geraden, die den einfallenden Laserstrahl beschreibt
u_0	Position des Laserstrahls bei $v=0$ (siehe Koordinatensystem in Abb. 5)
f	Brennweite des Objektivs
I	Intensität
I_0	Intensität, die in das Material eindringt
α	Absorptionskoeffizient
s	Abstand zwischen Objekt und Scheitelpunkt der Linse <i>oder</i> Standardabweichung <i>oder</i> gemessene Weglänge
s'	Abstand zwischen Bild und Scheitelpunkt der Linse
r	Krümmungsradius einer Linsenfläche
T	Translationsmatrix
B	Brechungsmatrix
R	Reflexionsmatrix <i>oder</i> Reflexionsgrad
M_{dick}	Strahlmatrix für eine dicke Linse
L	Linsenmatrix
n_L	Brechungsindex im Linsenmedium
d	Dicke der Linse <i>oder</i> Schichtdicke
l	geometrischer Weg
f'	bildseitige Brennweite
r_1	Krümmungsradius der gegenstandsseitigen Linsenfläche
r_2	Krümmungsradius der bildseitigen Linsenfläche
Δx	Wiederholgenauigkeit
x, x_i	Messwerte
\bar{x}	Mittelwert der Messwerte
z	Positionswert entlang der Achse der Laserstrahlung
U	Spannung
a, b	Parameter der Kennlinie zwischen Spannung und Entfernung

1 Einleitung

In der Industrie wurden durch die Verwendung von Laserstrahlung wesentliche Fortschritte darin erreicht, präziser arbeiten zu können. Die höchsten Intensitäten werden im Fokusbereich der Laserstrahlung erreicht. Aus diesem Grund befindet sich dort auch häufig das Werkstück. Um die Fokussuche in kürzerer Zeit durchführen zu können, ist das Ziel dieser Arbeit, diese unter Verwendung optischer Messmethoden zu automatisieren. Die Probe oder das Werkstück kann eine Oberfläche mit veränderlichen Höhen haben oder durch nicht senkrecht einfallende Laserstrahlung bearbeitet werden. Daher ist der Einsatz einer auf diffuser Reflexion beruhenden Abstandsmessung für die Anpassung des Fokusabstandes sinnvoll. Damit dies in Echtzeit erfolgen kann, muss die Messung durch den Bearbeitungskopf hindurch erfolgen. Für die vorhandenen optischen Abstandsmessmethoden ist zu überprüfen, ob diese durch Laseroptiken hindurch ohne zu große Verluste anwendbar sind. Dies ist vor Beginn dieser Arbeit in [1] bereits erfolgt. Dabei wurde ein Konzept zur mechanischen Befestigung erstellt. Die Integration des Messgerätes wird im Folgenden optimiert.

Bei Untersuchungen unter [1] wurde bereits der Einsatz eines Entfernungsmessgerätes für die Fokusslagebestimmung getestet. Dazu wurde ein handelsübliches, auf Laufzeitmessung beruhendes Entfernungsmessgerät mit einer Messgenauigkeit von 2,0 mm verwendet. Mit diesem wurde der Abstand der Probe vom Bearbeitungskopf gemessen. Dies kann mit dem Abstand des Fokus vom Bearbeitungskopf verglichen werden. Die Messung erfolgte nach dem in Abb. 1 gezeigten Prinzip durch den Bearbeitungskopf hindurch. Das Ziel ist dabei, dass die Messlaserstrahlung koaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung verläuft. Für eine Genauigkeitserhöhung verglichen mit vorhergehenden Untersuchungen lautet das Ziel 0,1 mm bei einer Brennweite von etwa 300 mm. Wenn dessen Einhaltung nicht möglich ist, dann wird versucht, dieser Genauigkeit so nahe wie möglich zu kommen. Auch wenn die Genauigkeit im Datenblatt des Messgerätes genannt wird, kann auf eine Überprüfung nicht verzichtet werden.

Die Messgenauigkeit ist von diversen Faktoren abhängig. Bei denen, auf die das Messgerät nicht ausgelegt ist, kann die Messgenauigkeit geringer sein als im Datenblatt angegeben wird. Ebenso notwendig ist die Bekanntheit der Wiederholgenauigkeit. Auch diese wird experimentell überprüft. Dabei muss beachtet werden, dass bei der Laufzeitmessung die Transmission durch Glas eine Messwertabweichung verursacht. Darüber gibt die Wiederholgenauigkeit keinen Aufschluss. Dies muss separat untersucht werden. Durch die Lichtgeschwindigkeit im Medium, die geringer ist als die Vakuumlichtgeschwindigkeit, entsteht eine Zeitdifferenz. Diese bewirkt eine Differenz des gemessenen Weges, da Entfernungsmessgeräte meist auf die Messung in Luft ausgelegt werden.

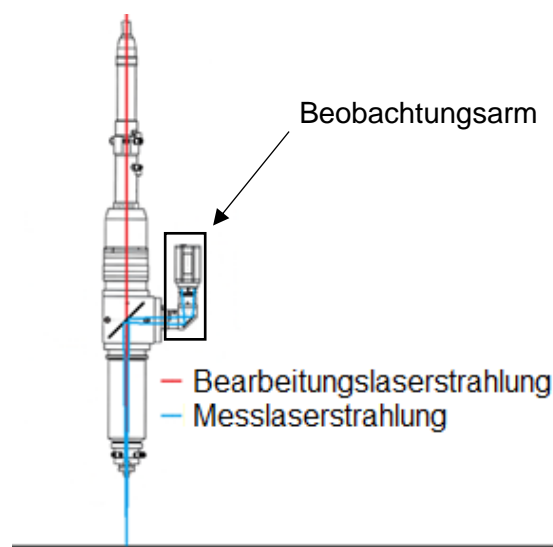


Abbildung 1: Skizze bisheriger Versuchsaufbau, nach von Trumpf bereitgestellter Zeichnung

Bei vorhergehenden Untersuchungen wurde eine mechanische Vorrichtung zur Befestigung und wiederholgenauen Positionierung des Messgerätes konstruiert. In Abb. 1 ist der ursprünglich geplante Strahlengang gezeigt. Der Unterschied zur tatsächlichen Umsetzung ist, dass der Beobachtungsarm nicht durchstrahlt wird. Dieser wird abmontiert und durch die mechanische Vorrichtung ersetzt. Der Grund dafür sind geometrische und optische Bedingungen, die verhindern, dass die Messlaserstrahlung in ausreichender Intensität durch den Beobachtungsarm gelangt. Im Folgenden wird untersucht, ob eine Möglichkeit gefunden werden kann, den Beobachtungsarm zu durchstrahlen. Ist dies der Fall, geht das mit der Konstruktion einer anderen Vorrichtung einher. Auch wenn ein Messgerät mit anderen Maßen genutzt wird, muss eine neue Vorrichtung konstruiert werden. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen ist die Konstruktion eines industrietauglichen Gehäuses vorgesehen.

Das steuerungstechnische Ziel ist, dass der Laserbearbeitungskopf automatisch an die Stelle verfährt, bei der der Fokus auf der Werkstückoberfläche liegt. Dazu soll das automatische Verfahren des Maschinentisches in der Laseranlage auf Grundlage der Messung des Abstandes gesteuert werden. Bei dem bisher verwendeten Messgerät ist das nicht möglich, da es als komplettes Gerät gekauft wurde und nicht über solch einen Anschluss verfügt. Das grundlegende Konzept ist es also, Einzelteile zu kaufen und dabei zu betrachten, welche Elemente zusammengefügt werden können. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass die Stromversorgung nicht durch eine Batterie erfolgt, da der Batteriewechsel im Produktionsbetrieb nicht angemessen ist. Durch das Konzept der Zusammensetzung verschiedener Einzelteile besteht eine große Gestaltungsvielfalt hinsichtlich des Stromlaufplans. Dazu sollte ebenso wie der Anschluss an eine Steuerung beachtet werden, dass eine Anzeige verfügbar ist.

Die bisher nicht vorhandene Möglichkeit, das Messgerät zu nullen, ist ein weiteres Ziel. Dies sollte so gestaltet sein, dass das Messgerät null anzeigt, wenn der Fokus des Bearbeitungskopfes auf der Probenoberfläche liegt. Dadurch muss bei der Kombination mit der Lasersteuerung der Messwert nur noch mit null abgeglichen werden. Das und die Steuerung der Laserachsen kann mit Hilfe eines Mini-PC, in dem die entsprechende Software enthalten ist, realisiert werden.

Um eine umfassende Nutzung dieser Entfernungsmessung zu garantieren, müssen noch weitere Einflüsse auf die Wiederholbarkeit und die Messgenauigkeit untersucht werden. So kann die Messgenauigkeit von der zu vermessenden Oberfläche abhängen. Intuitiv ist zu erwarten, dass bei einer rauen Oberfläche sich die Messgenauigkeit gegenüber einer glatten Oberfläche verringert. Ein veränderter Einstrahlwinkel kann den Messwert und die Messgenauigkeit ebenso beeinflussen. Durch das Verfahren der Lasertriangulation oder der Laufzeitmessung ist dabei weiterhin eine Messung möglich. Diese beiden Verfahren beruhen auf diffuser Reflexion. Beide Einflüsse werden experimentell untersucht.

2 Stand der Technik

Optische Abstandsmessungen zählen zu den genauesten Entfernungsmessmethoden. Als Beispiel ist zu nennen, dass die Entfernung des Mondes mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern gemessen werden kann. Zu den verbreiteten Messbereichen gehören bereits jene von mehreren 100 km. Auch für die Messung der Größen von Flächen können optische Entfernungsmessmethoden angewendet werden [2]. In modernen Geräten ist ein Mikroprozessor eingebaut, um durch umfangreiche Rechenschritte derartige Messungen umsetzen zu können. Dieser kann auch für die Berechnung eines Volumens eingesetzt werden [3].

Als Beispiel für optische Abstandsmessmethoden ist die Interferometrie zu nennen. Diese wird aufgrund wirtschaftlicher Bedingungen, die in dieser Arbeit noch unter 4.3 näher erläutert werden, nicht für die Fokusslagebestimmung eingesetzt. Allerdings ist die breite Anwendung in der Forschung aufgrund ihrer vielseitigen Vorzüge erwähnenswert. Dazu ist der Nachweis der Gravitationswellen Anfang 2016 als Beispiel zu nennen, wofür ein Michelson-Interferometer eingesetzt wurde. Dazu wurden zwei Detektoren verwendet, die aus hochreinem Quarzglas bestehen. Zu dessen Eigenschaften gehören die optische Isotropie und die hohe Homogenität. Das verwendete Michelson-Interferometer beinhaltet Detektoren in einem Abstand von 4 km. [4]

Für das Ziel dieser Arbeit ist es bedeutsam, ob dieses schon in der Industrie umgesetzt wurde. Um die Fokusslage einzustellen, gibt es bereits Autofokussysteme, die einen ähnlichen Zweck erfüllen wie das System, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wird. Diese sind anders aufgebaut und wirken sich somit anders aus. Daher ist es weiterhin zweckmäßig, das Ziel dieser Arbeit zu verfolgen. Dennoch werden hier weitere Autofokussysteme erläutert. Wie in Abb. 2 gezeigt ist, wird bei einem davon die Laserstrahlung in einen transmittierten und einen absorbierten Teil aufgeteilt, kollimiert und auf das Werkstück gelenkt. Unebenheiten führen zu einer afokalen Lage der Probenoberfläche. Ein sich ändernder Reflexionswinkel ist die Folge. Dies wird vom Sensor erkannt und die erforderliche Höhe des Bearbeitungskopfes für die Lage des Fokus auf der Probenoberfläche wird berechnet. [5] Weitere bereits vorhandene Autofokussysteme sind dem in dieser Arbeit aufzubauenden Autofokussystem bereits ähnlich. Entfernungsmesser wurden bereits für die Einstellung der Werkstückposition auf die Art verwendet, dass sich die Probenoberfläche im Fokus befindet.

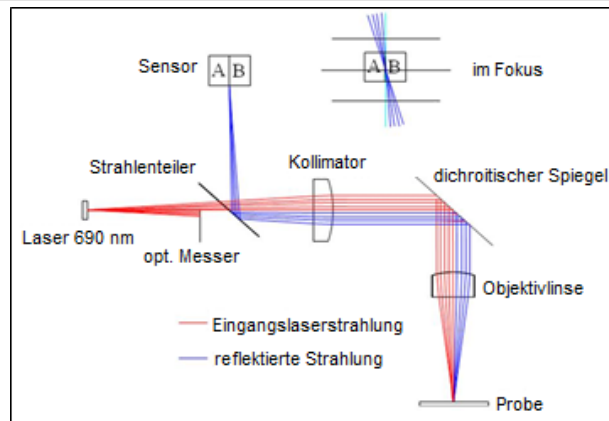


Abbildung 2: Autofokussystem, nach [5]

Bei dem in Abb. 3 gezeigten System erfolgte die Messung nicht durch den Bearbeitungskopf hindurch und nicht koaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung. Wenn diese nicht senkrecht eingestrahlt werden kann oder wenn die Probenoberfläche rau oder gekrümmt ist, führt das dazu, dass dies verzögert detektiert wird, sodass sich die Werkstückoberfläche zeitweise nicht im Fokus befindet. Die von Optoprim Germany GmbH realisierte Variante in Abb. 4 nutzt Entfernungsmesser, die auf der konoskopischen Holografie beruhen. Dabei erzeugt die rückreflektierte Strahlung ein Interferenzmuster, was mit CCD- und CMOS-Elementen analysiert wird. Dadurch kann die Messlaserstrahlung koaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung geführt werden. Bei der Lasertriangulation funktioniert dies bisher nicht. Dies ist ein Grund dafür, dass diese Arbeit als Ziel hat, eine zur Bearbeitungslaserstrahlung koaxiale Messung auch für Verfahren wie die Lasertriangulation zu realisieren. [6]

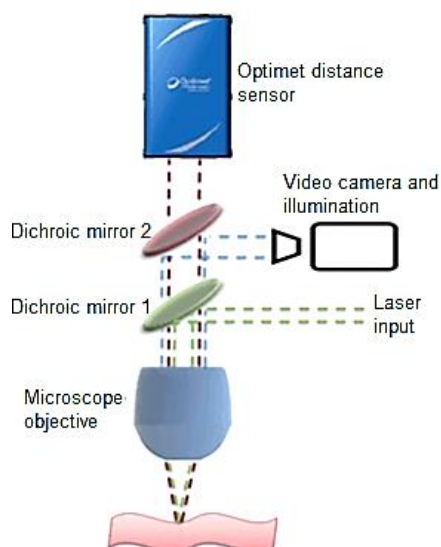


Abbildung 3: Autofokus durch Entfernungsmesser, nicht koaxial, nach [6]

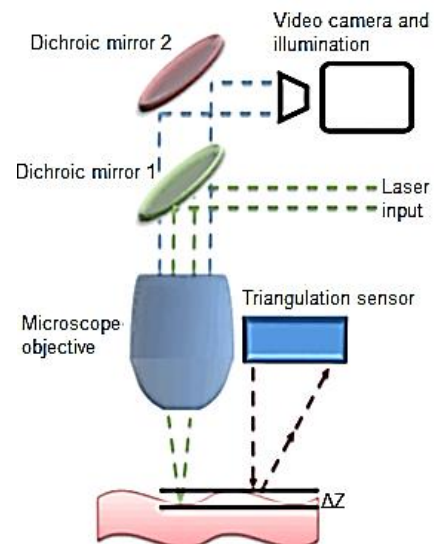


Abbildung 4: Autofokus durch Entfernungsmesser, koaxial, nach [6]

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Abstandsmessverfahren

3.1.1 Lasertriangulation

Zu den optischen Entfernungsmessmethoden gehört die Lasertriangulation. Beim Auftreffen auf das Werkstück wird die Laserstrahlung diffus reflektiert und am Detektor hinsichtlich der Intensität und ihrer Verteilung ausgewertet. Zwischen der einfallenden und der diffus reflektierten Wellennormale lassen sich Winkelgrößen ermitteln, die als Grundlage für die Abstandsberechnung dienen. [2] Fällt die Laserstrahlung nach einem veränderten Weg auf die Oberfläche auf, kommt es zu einer Verschiebung des Bildpunktes. Bei einer Neigung des Detektors gegen die Mittelachse der Linse ist eine scharfe Abbildung möglich. Dabei müssen die Mittelachse der Linse (in Abb. 5: u -Achse), die Ebene der Oberfläche des Detektors und die Wellennormale des Laserstrahls einen gemeinsamen Schnittpunkt aufweisen, was Scheimpflug-Bedingung genannt wird. Diese Bedingung kann für beliebige Neigungen des Objektivs erfüllt sein. Daher können auf Triangulation beruhende Systeme so kompakt gebaut werden, dass sie ebenso wie Laufzeitmessgeräte in handelsüblichen Entfernungsmessern vertreten sind. Die Bildkoordinate z' ist nahezu linear von der Koordinate z des Leuchtflecks abhängig und die zugehörige Gleichung lautet [7]

$$z' = z \cdot \sqrt{1 + \left(m_L - \frac{u_0}{f}\right)^2} \cdot \frac{m_L \cdot f}{z \cdot \left(m_L - \frac{u_0}{f}\right) + \sqrt{1 + m_L^2 \cdot (2u_0 - m_L \cdot f - \frac{u_0^2}{m_L \cdot f})}} \quad (1)$$

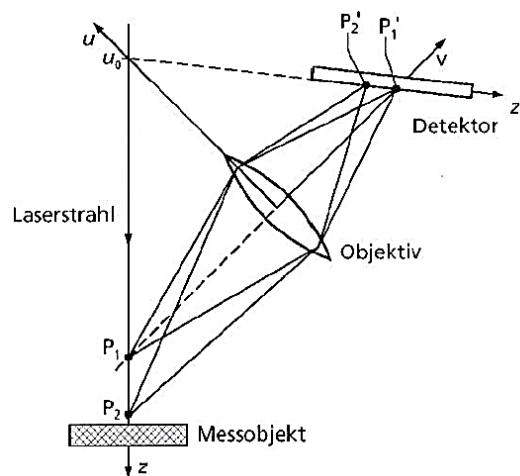


Abbildung 5: Schema Lasertriangulation [7]

3.1.2 Laufzeitmessung

Laufzeitmessungen beruhen darauf, die Konstanz und Bekanntheit der Lichtgeschwindigkeit, die $2,998 \cdot 10^8$ m/s beträgt, zu nutzen. Aus der Zeit, die zwischen der Aussendung und dem Empfangen von diffus rückreflektierter Strahlung vergeht, kann die Entfernung berechnet werden. Der Weg, den die Strahlung zurücklegt, entspricht der doppelten Entfernung des reflektierenden Objektes. Die Reflexion kann sowohl gerichtete als auch diffuse Reflexion sein. Aufgrund der kurzen Zeit, die elektromagnetische Strahlung benötigt, muss die Zeit entsprechend genau gemessen werden können, was die Messgenauigkeit dieses Verfahrens einschränkt. [8]

Unterschieden werden das Puls- und das Phasenlaufzeitverfahren. Beim Pulslaufzeitverfahren muss jeder einzelne kurze Laserpuls seinen Durchlauf vollenden und anschließend kann ein neuer Laserpuls ausgesendet werden. Durch den nötigen Aufwand kann erreicht werden, dass bei teiltransparenten Objekten die Entfernung aller sich ergebenden Reflexionspunkte gemessen wird. [8]

Das Phasenlaufzeitverfahren beruht auf der Ermittlung der Zeitverschiebung auf Grundlage der Phasenverschiebung zwischen der hin- und der rücklaufenden Strahlung. Dazu wird ein Modulationssignal verwendet. Wird dessen Wellenlänge überschritten, entstehen Mehrdeutigkeiten aufgrund der Überlagerung verschiedener Phasen, die kein eindeutiges Messergebnis ermöglichen. Vermieden werden kann das dadurch, die Modulationsfrequenz zu variieren. Für das Phasenlaufzeitverfahren wird cw-Strahlung verwendet. [8]

3.2 Linsenoptik

Der Strahlengang der Messlaserstrahlung wird durch die Brechung am Objektiv (Fokussierlinse) beeinflusst. Dazu liegt das Snellius'sche Brechungsgesetz zu Grunde [9]:

$$n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon' \quad (2)$$

Aus diesem lassen sich für die Transmission durch eine Linse weitere Gleichungen ableiten. Eine davon ist die Schnittweitengleichung. Diese beschreibt das Verhalten des einfallenden und des an einer Linsenfläche gebrochenen Strahls bezüglich der Entfernung des Schnittpunktes mit der optischen Achse vom Scheitelpunkt der Linse (Schnittweite) und lautet [9]

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (3)$$

Aus dieser lassen sich Gleichungen der Matrixmethode herleiten. Diese wird dazu benutzt, den Strahlengang durch mehrere optische Elemente zu berechnen. Für eine Simulation des Strahlengangs an der Fokussierlinse wird die Matrixmethode benötigt. Die Translationsmatrix T , die Brechungsmatrix B und die Reflexionsmatrix R liegen dabei zu Grunde [9]:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & -l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n' - n}{nr} & \frac{n}{n'} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-2}{r} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Daraus ergibt sich die Strahlmatrix für eine dicke (Gleichung (7)) und für eine dünne Linse (Gleichung (8)) mit der Mittendicke $d = 0$ [9].

$$M_{\text{dick}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n' - n_L}{nr_2} & \frac{n_L}{n'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_L - n}{n_L r_1} & \frac{n}{n_L} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f'} & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

3.3 Prozesse beim Auftreffen von Strahlung auf einen Körper

3.3.1 Streuung und diffuse Reflexion

Zwei Arten der Streuung von Strahlung können unterschieden werden. Zum einen gibt es die Streuung im Inneren des Körpers, die für die Entfernungsmessung keine wesentliche Rolle spielt und durch Inhomogenitäten verursacht wird. Die Streuung an der Oberfläche ist hingegen bei der Entfernungsmessung zu berücksichtigen. In Abb. 6 ist diese skizziert. Sie tritt durch die Rauheit von Oberflächen auf. Die Rauheit kann bei verschiedenen Oberflächen unterschiedlich sein und ist stets ungleich null. Für manche Oberflächen ist sie allerdings vernachlässigbar, da sie bei diesen gering ist.

Die meisten Oberflächen von mit dem Laser zu bearbeitenden Werkstücken weisen eine höhere Rauheit auf. Bei solchen Oberflächen gewinnt die diffuse Reflexion oder Streuung an Oberflächen zunehmend an Bedeutung. Durch die Rauheit ändert sich ständig die Lage des Lots für die Reflexion. Unterschiedliche Reflexionswinkel sind die Folge. Da bei der Lasertriangulation und bei der Laufzeitmessung gestreute Strahlung vermessen wird, ist dieser Effekt für diese Verfahren anwendbar. Bei der Interferometrie hingegen wäre die Streuung von Strahlung hinderlich für eine erfolgreiche Messung.

Wie viel Intensität an der Empfangseinheit des Messgerätes für die Lasertriangulation oder für die Laufzeitmessung ankommt, hängt von der Intensitätsverteilung bei der diffusen Reflexion und vom Einstrahlwinkel ab. Daher kann auch keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob die Intensität an der Empfangseinheit durch diffuse Reflexion erhöht oder verringert wird. Bei senkrechter Einstrahlung ist allerdings zu erwarten, dass sie verringert wird. Eine Verringerung der Messgenauigkeit ist bei einer rauen Oberfläche zu erwarten, da durch die Rauheit die Entfernung der Oberfläche zum Messgerät schwankt.

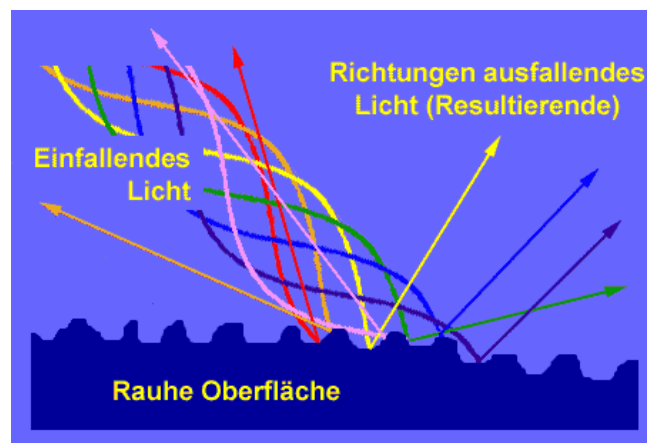


Abbildung 6: diffuse Reflexion [10]

3.3.2 Reflexion und Transmission

Aus den Fresnel-Koeffizienten (FK) lassen sich Reflexions- und Transmissionsgrade berechnen. Für die Reflexion lautet der FK bei senkrechter Polarisierung

$$r_s = \frac{n' \cos \theta - n \cos \theta'}{n' \cos \theta + n \cos \theta'} \quad (9)$$

und bei paralleler Polarisierung [9]

$$r_p = \frac{n' \cos \theta - n \cos \theta'}{n' \cos \theta + n \cos \theta'}. \quad (10)$$

Bei der Transmission werden für senkrechte und für parallele Polarisation die FK angegeben mit [9]

$$t_s = \frac{2n \cdot \cos \varepsilon}{n \cdot \cos \varepsilon + n' \cdot \cos \varepsilon'} \quad (11)$$

und

$$t_p = \frac{2n \cdot \cos \varepsilon}{n' \cdot \cos \varepsilon + n \cdot \cos \varepsilon'} \quad (12)$$

Der jeweilige Transmissions- oder Reflexionsgrad ist das Betragsquadrat des FK. Durch gezielte Beschichtung eines optischen Elements kann der Reflexions- und damit der Transmissionsgrad gezielt gesteuert werden. Dazu werden Reflexionen an den Grenzflächen zwischen den Schichten genutzt. Bei mehreren solchen Reflexionen kommt die Interferenz hinzu, die durch Verstärkung oder Abschwächung bis Auslöschung die Intensität der Laserstrahlung beeinflusst. Eine Auslöschung tritt bei einer Einzelschicht für

$$n \cdot d = \frac{\lambda}{4} \cdot (2m + 1) \quad (13)$$

und

$$n_s = \sqrt{n_1 \cdot n_2} \quad (14)$$

auf [7]. Ansonsten resultieren die in Abb. 7 dargestellten Kurven für einen senkrechten Einfall.

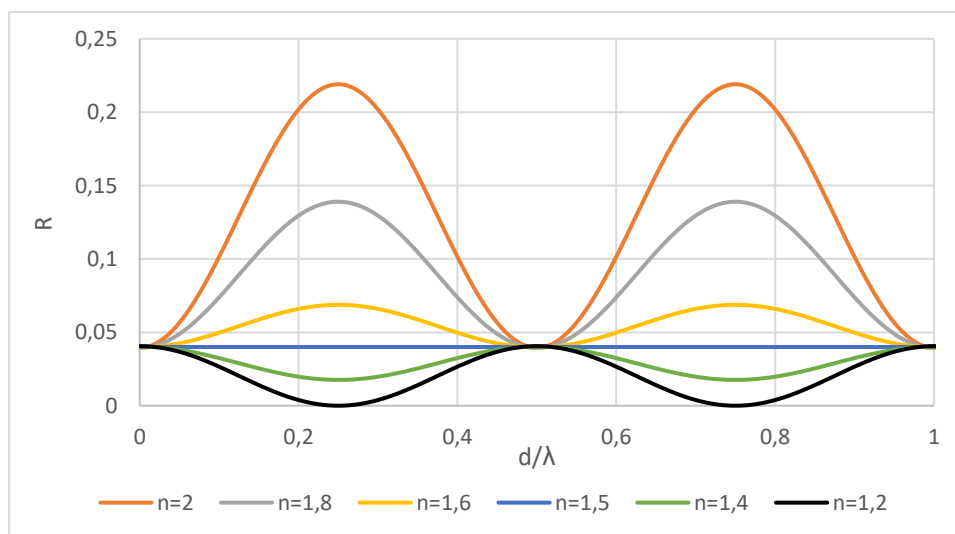


Abbildung 7: Reflexionsgrad in Abhängigkeit von Schichtdicke und Brechzahl der Beschichtung

Je mehr Schichten ein Schichtsystem aufweist, desto vielseitiger werden die Kurvenverläufe. Durch die Wahl der Schichtdicken und einzelnen Brechungsindizes sind die Verläufe variierbar. Ein Beispiel wird in Abb. 8 für einen senkrechten Einfall gezeigt.

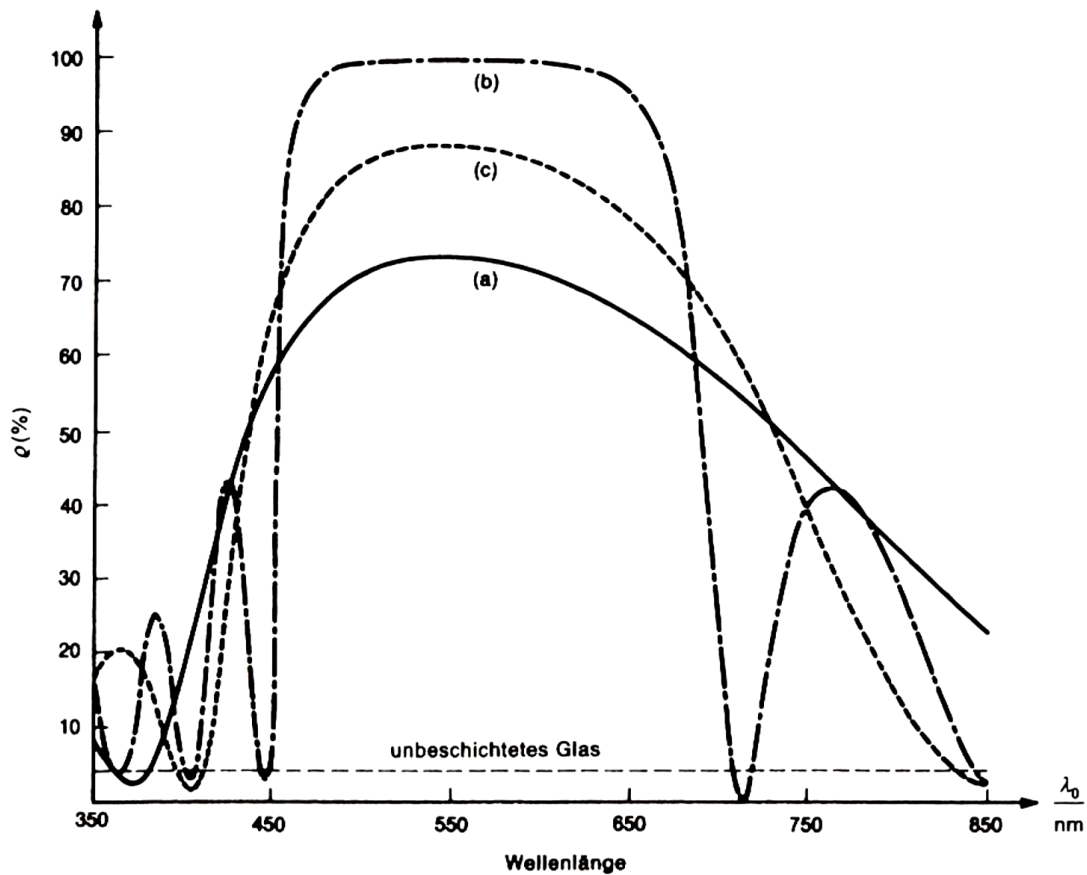


Abbildung 8: Beispiele für Brechzahlverläufe an Mehrschichtsystemen ($\lambda/4$ -Schichten hoch-niedrig mit a) zwei, b) sechs Doppelschichten und c) zwei Doppelschichten mit zusätzlicher hochbrechender Schicht) [9]

Solche Verläufe sind auch bei den Optiken in den Bearbeitungsköpfen vorhanden. Die genaue Schichtenzusammensetzung ist der SITEC nicht bekannt. Für Bearbeitungen ist die Bekanntheit der Schichtzusammensetzung nicht notwendig, da diese darauf ausgelegt wurde. Jedoch würden sich daraus die Transmissionsgrade durch die optischen Elemente für die Wellenlänge der Messlaserstrahlung berechnen lassen. Um ohne Bekanntheit der Schichtzusammensetzung die Transmission der Messlaserstrahlung zu untersuchen, werden bereitgestellte Transmissionskurven angewendet. Auf diese wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

3.3.3 Absorption

Für die Betrachtungen, welcher Anteil der Laserstrahlung durch den Bearbeitungskopf hindurchtreten kann, wurde meist davon ausgegangen, dass sich die Laserstrahlung in einen reflektierten und einen transmittierten Anteil aufspaltet. Für die Optiken im Bearbeitungskopf ist dies durch die geringe Absorption realitätsnah.

Am meisten Absorption tritt an der Probenoberfläche auf. Dies ist erwünscht, da dadurch eine Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung möglich ist. Für die Entfernungsmessung bedeutet dies jedoch einen Verlust, der unterschiedlich groß ist, da das Material und die Oberflächenbeschaffenheit bei allen Proben unterschiedlich sind. Jedoch sind die Absorptionsgrade verschiedener Materialien bei einer geringen Rauheit und einer Dicke, bei der die Transmission vernachlässigt werden kann, bekannt. Diese sind wellenlängenabhängig, wie Abb. 9 zeigt. Da die Wellenlänge der Messlaserstrahlung konstant ist, lassen sich diese für ein bestimmtes Material berücksichtigen.

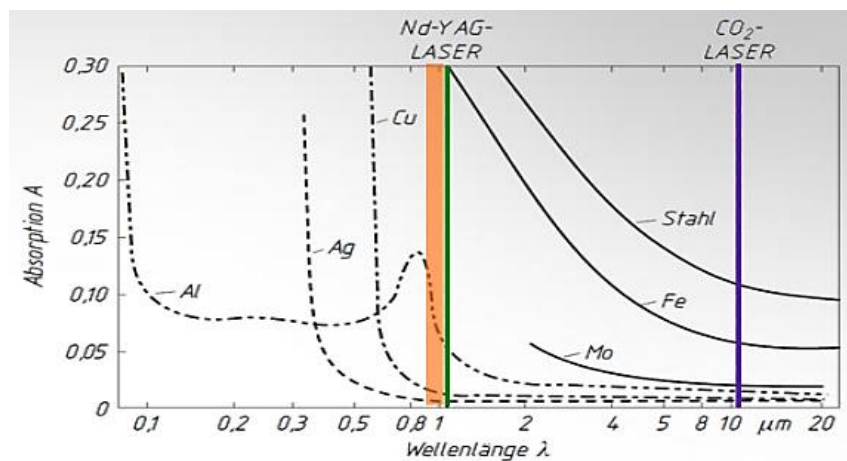


Abbildung 9: wellenlängenabhängige Absorptionsgrade verschiedener Metalle [11]

Weiterhin lässt sich die Absorption durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschreiben:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (15)$$

Da Glas einen wesentlich geringeren Absorptionskoeffizienten hat als Metalle, ist die Absorption bei den Optiken gegenüber der Transmission vernachlässigbar. Aufgrund der begrenzten Dicke ist bei diesem Absorptionskoeffizienten kein hoher Absorptionsgrad möglich. An der Probe ist jedoch die Transmission gegenüber der Absorption vernachlässigbar, da dies meist metallische Proben / Werkstücke sind. Diese haben einen hohen Absorptionskoeffizienten, sodass die Transmission außerhalb des Dünnschichtbereichs vernachlässigt werden kann.

3.4 Messgenauigkeitsbetrachtungen

3.4.1 Fehlerarten

Verschiedene Arten von Fehlern können in der Messtechnik unterschieden werden. Eine Unterscheidungsart ist die Unterscheidung in zufällige und systematische Fehler. Bleibt ein Einfluss über die Zeit der Messung erhalten, so ist das ein systematischer Fehler. Zufällige Fehler entstehen durch unbekannte Einflüsse, die im Verlauf der Messung schwanken können. Die Berücksichtigung von zufälligen Fehlern ist insofern schwieriger, dass sie nicht herausgerechnet werden können. Somit sollte also nach Messgeräten mit einem geringen zufälligen Fehler gesucht werden, d. h. die Wiederholgenauigkeit sollte möglichst hoch sein. Bei den Entfernungsmessgeräten ist diese zum Teil angegeben. Aber auch mechanische Erschütterungen sind zu vermeiden, da diese einen zufälligen Fehler darstellen, der nicht im Datenblatt berücksichtigt wurde.

Die verschiedenen Fehler können noch auf andere Arten unterschieden werden. Die nachfolgend genannten Fehlerarten beruhen auf der Unterscheidung nach dem Verlauf der Kennlinie zwischen der Ein- und Ausgangsgröße des Messsystems. Sie können sowohl zufällige als auch systematische Ursachen haben. [12] So gibt es den Proportionalitätsfehler, der eine falsche Proportionalität zwischen Ein- und Ausgangsgröße zu Grunde legt. Dieser ist in Abb. 10 gezeigt. Bei einer Entfernungsmessung hat das zur Folge, dass mit steigender Entfernung eine geforderte absolute Genauigkeit schwieriger erreicht werden kann.

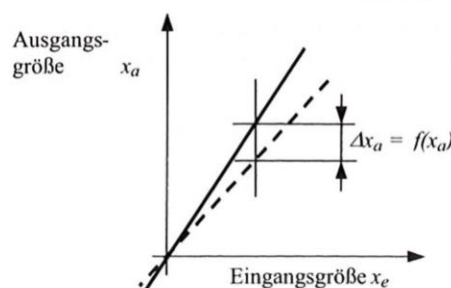


Abbildung 10: Proportionalitätsfehler [12]

Ebenso können Nullpunktfehler auftreten, bei denen Ein- und Ausgangsgröße nicht mehr den gleichen Nullpunkt haben. Diese sind in Abb. 11 skizziert. Wenn bei einer Entfernungsmessung stets die gleiche Referenz verwendet wird und die verschiedenen Messwerte miteinander verglichen werden, hebt sich ihr Einfluss auf, solange es sich um einen systematischen Nullpunktfehler handelt.

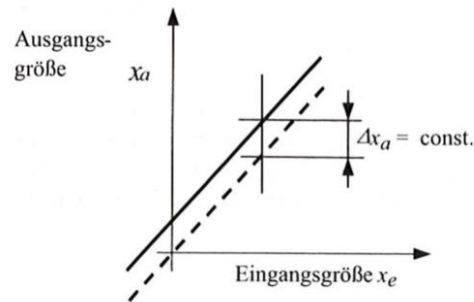


Abbildung 11: Nullpunktfehler [12]

Eine weitere Fehlerart ist die Nichtlinearität, die in Abb. 12 skizziert ist. Diese ist schwer zu berücksichtigen, weil bei dieser Fehlerart der Verlauf der Kennlinie zwischen Ein- und Ausgangsgröße schwer herauszufinden ist. Sie wird linear erwartet, ist bei dieser Fehlerart allerdings nicht linear. Wird bei einer Entfernungsmessung wiederholt die gleiche Entfernung gesucht, so spielt diese Fehlerart eine geringere Rolle als die Wiederholgenauigkeit.

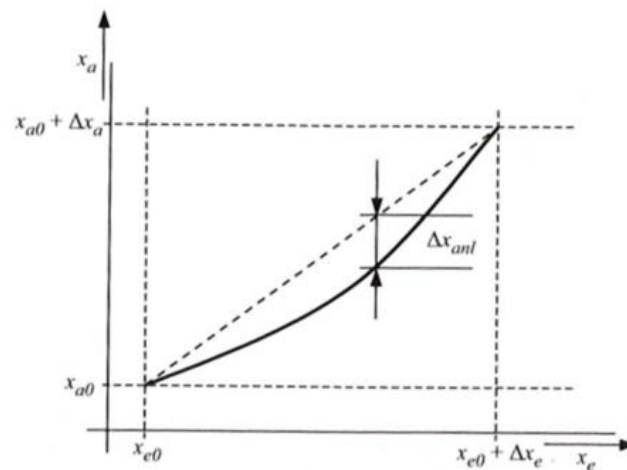


Abbildung 12: Nichtlinearität [12]

Auch eine Hysterese kann bei Messgeräten auftreten. Dabei haben Ein- und Ausgangsgröße bei einer Zunahme einen anderen Zusammenhang als bei einer Abnahme des Messwertes. Bei einem systematischen Auftreten ist es möglich, diese Hysterese zu ermitteln und somit herauszurechnen. Bei manchen Entfernungsmessgeräten wurde sie bereits vom Hersteller berücksichtigt und ist auch einstellbar. In Abb. 13 ist ein Beispiel für eine Hysterese dargestellt.

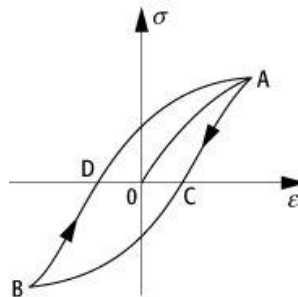


Abbildung 13: Hysterese [13]

3.4.2 Kenngrößen

Eine der Kenngrößen zur Charakterisierung der Messgenauigkeit eines Messsystems ist die Wiederholgenauigkeit. Sie beschreibt die maximale Abweichung eines Messwertes vom Mittelwert nach der Gleichung (16). Das Verhalten der Wiederholgenauigkeit bei einem Messsystem hängt eng mit dem Verhalten der Standardabweichung zusammen. Beide Größen beschreiben, wie weit die Messwerte streuen, wenn diese miteinander verglichen werden. Die mathematische Definition der Wiederholgenauigkeit lautet

$$\Delta x = |x - \bar{x}|_{\max}. \quad (16)$$

Der Unterschied zur Standardabweichung ist, dass diese als mittleres Streumaß aufzufassen ist, während die Wiederholgenauigkeit beschreibt, wie weit die Messwerte maximal streuen. In dieser Arbeit wird die Standardabweichung gemessen, während die Wiederholgenauigkeit in Datenblättern zu finden ist. Die Messgenauigkeit, die sich insgesamt ergibt, ist geringer als die Wiederholgenauigkeit. Ohne systematische Fehler (in der Realität nicht möglich) ist sie gleich groß. Die Standardabweichung lässt sich durch diese Gleichung beschreiben [14]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (17)$$

Diese beiden Kenngrößen spielen für das vorliegende Ziel eine zentrale Rolle, da die Fokuslage zuerst mit konventionellen Methoden ermittelt und dann mit dem Entfernungsmessgerät ausgemessen werden kann. Die Linearität oder Nichtlinearität wurde als Fehlerart bereits in dieser Arbeit erwähnt, da sie sowohl als Kenngröße als auch als Fehlerart betrachtet werden kann. Meistens wird sie in Prozent angegeben [15], da dann ein veränderlicher Proportionalitätsfaktor oder vergleichbarer Parameter einer Kennlinie entsprechend für alle Messwerte gleichermaßen dargestellt werden kann. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich der Proportionalitätsfaktor in höheren Messbereichen stärker auf den absoluten Fehler auswirkt.

Weiterhin ist die Auflösung, die in Abb. 14 skizziert ist, ein Maß für die Messgenauigkeit. Ihre Definition bezieht sich darauf, wie empfindlich ein Messsystem ist. Als Auflösung wird die Eigenschaft bezeichnet, die beschreibt wie klein die minimalen Unterschiede zwischen zwei Messwerten sind, die vom Messgerät noch unterschieden werden können. Diese Definition ist verwandt mit der Definition in der abbildenden Optik, in der die Auflösung den minimalen Abstand zwischen zwei unterscheidbaren Bildpunkten beschreibt. Bei der Entfernungsmessung bezieht sie sich auf den Abstand unterscheidbarer Entfernungen. Davon abzugrenzen ist die Anzeigaauflösung, die die Anzahl an Stellen auf dem Entfernungsmessgerät angibt. Sie ist meist höher als die Messgenauigkeit. Eine Unterscheidung zwischen zwei Messwerten lässt keine direkte Aussage über den Unterschied zur tatsächlichen physikalischen Größe zu. Dennoch haben Messsysteme mit einer hohen Auflösung auch meist eine hohe Messgenauigkeit.

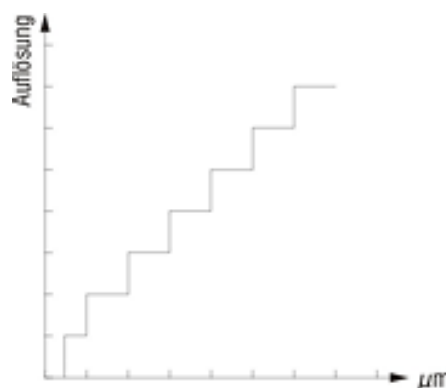


Abbildung 14: Auflösung [15]

4 Material und Methoden

4.1 Vorstellung der Anlagentechnik

Für die Laseranlagen LS 64C, LWS-P1000, LS 108CI, LWS-C, LWS-DM4 und -DM5 sowie SYSLAS werden Laser der Firma Trumpf Laser GmbH + Co. KG eingesetzt. Demzufolge sind bei diesen Laseranlagen auch die Bearbeitungsköpfe von dieser Firma. Als Modell wird in Abb. 15 ein Bearbeitungskopf gezeigt, der zum Beginn der Untersuchungen in der SYSLAS verbaut ist. Dabei handelt es sich um eine BEO D70, eine oft von der Firma Trumpf gebauten Art von Bearbeitungsköpfen mit einer Fokussierlinse mit einem Durchmesser von 70 mm. Für die Messungen zur Überprüfung der Eigenschaften des Messgeräts wird der gezeigte Bearbeitungskopf verwendet. Dieser kann auch an die LWS-C MIFULAS montiert werden. Dies ist die Laseranlage, an der die Messungen durchgeführt werden. Wenn er an keine dieser Anlagen montiert ist, kann er auf einer beliebigen Fläche liegend als Demonstrator verwendet werden.

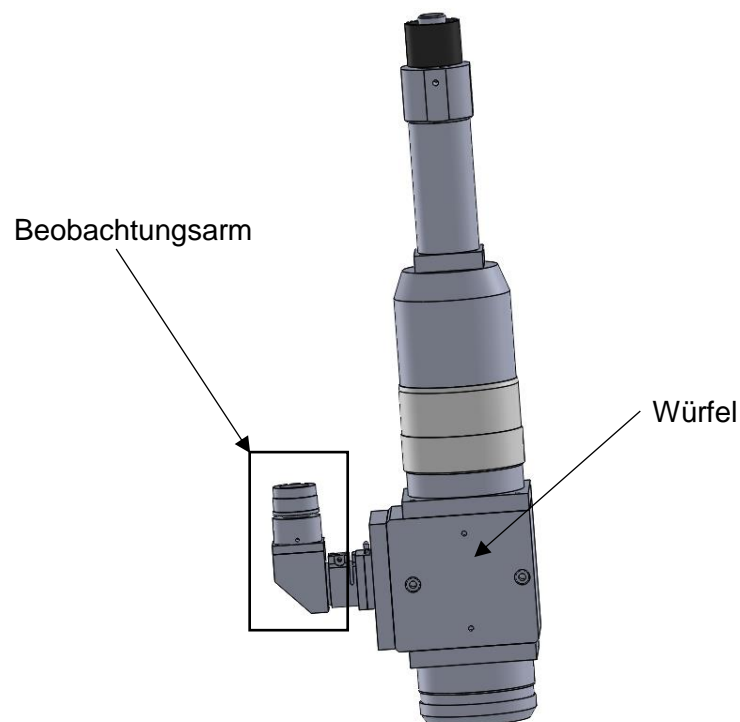


Abbildung 15: Modell des Bearbeitungskopfes der Laseranlage SYSLAS

Die Laseranlagen LS 64C, LWS-P1000 und SYSLAS werden von einem Scheibenlaser der Firma Trumpf angesteuert, dem TruDisk5001. Dessen Wellenlänge liegt bei 1030 nm und die Laserleistung beträgt 5000 W [15]. Der Bearbeitungskopf aus Abb. 15 ist, wie in dieser zu sehen ist, als 0°-Variante aufgebaut. Weitere Varianten sind die 90°- und die 2 x 90°-Variante, die ebenso wie die 0°-Variante in den Abb. 16 und 17 dargestellt sind.

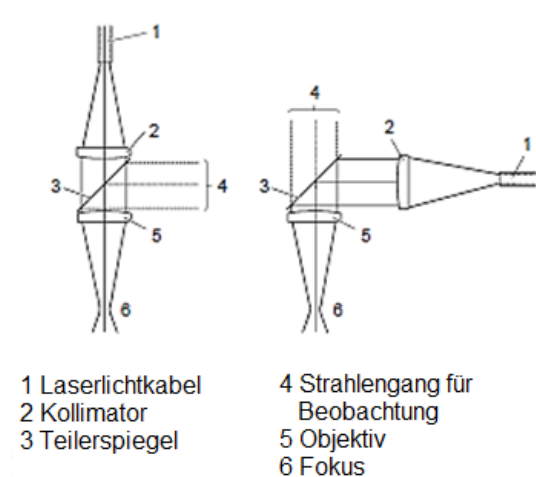


Abbildung 16: Schema des 0°- (links) und des 90°- Aufbaus (rechts) [16]

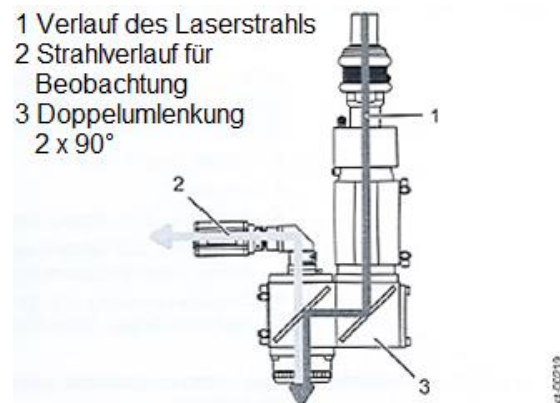


Abbildung 17: Skizze des 2 x 90°-Aufbaus [17]

Um die Messbereiche der Entfernungsmesser aussuchen zu können, werden in Tab. 1 die Brennweiten der verschiedenen Bearbeitungsköpfe dargestellt. Die genannte Laseranlage ist jeweils die, in der der Bearbeitungskopf zum Beginn der Untersuchungen verbaut ist. Der Unterschied zwischen der für die Brennweite geltenden Referenz (Fokussierlinse) und der Referenz des Messgeräts muss bei der Auswahl des Messbereiches hinzuaddiert werden. Das Messgerät misst durch einen Teil des Bearbeitungskopfes hindurch. Damit resultieren ausgehend von Tab. 1 Weglängen bis 500 mm. Somit sollte die obere Grenze des Messbereiches nicht kleiner als 500 mm sein.

Tabelle 1: Brennweiten der Bearbeitungsköpfe der verschiedenen Laseranlagen

Laseranlage	Brennweite des Bearbeitungskopfes
LS 64 C, LWS-P1000	280 mm
SYSLAS (später LWS-C MIFULAS)	280 mm
LWS-C	280 mm
LWS-DM4, -DM5	100 mm
LS 108 CI	300 mm

4.2 Bisherige Lösung

Das in [1] verwendete Abstandmessgerät beruht auf Laufzeitmessung, wurde von der Firma Robert Bosch GmbH gefertigt und trägt den Namen GLM 30. Für die Erzeugung der Messlaserstrahlung wird eine Laserdiode verwendet. Das Messgerät weist die in Tab. 2 genannten Daten auf. Aufgrund seiner geringen Kosten von 53 € konnte dieses wirtschaftlich eingesetzt werden und hatte ein für erste Versuchszwecke geeignetes Kosten-Nutzen-Verhältnis. [18]

Tabelle 2: Technische Daten GLM 30 [19]

Wellenlänge	635 nm
Messbereich	0,15 bis 30 m
Leistung Laser	< 1 mW
Genauigkeit Positionsmessung	2,0 mm
Messzeit	< 0,5 s
Masse	0,09 kg
Abmessungen	41 mm x 105 mm x 24 mm

Mathematisch und experimentell konnte festgestellt werden, dass damit eine Entfernungsmessung durch die Optik hindurch wiederholbar möglich ist. Dies gilt vor allem, wenn die Entfernung der Probenoberfläche dem Fokusabstand nahe kommt. In diesem Bereich sind die Wiederholbarkeit und die Messgenauigkeit maximal. Bei anderen Entfernungen kann der veränderte Winkel der Messlaserstrahlung zu einem veränderten Reflexions- und Transmissionsverhalten führen oder geometrische Einschränkungen erzeugen. Ein Einfluss der Fokussierung ist möglich. Die Messlaserstrahlung dieses Entfernungsmessgeräts ist der Laserklasse 2 zuzuordnen. Das Messgerät wird mit Batterien mit einer Spannung von jeweils 1,5 V betrieben. Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Messlaserstrahlung beträgt 10 mm, wie Abb. 18 zeigt. [19]



Abbildung 18: Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Messlaserstrahlung bei GLM 30 [19]

Die Befestigung des Messgeräts am Bearbeitungskopf erfolgt, indem der in Abb. 15 gekennzeichnete Beobachtungsarm abmontiert und mitsamt der Platte, an der er sich befindet, durch eine Vorrichtung ersetzt wird. Die Vorrichtung ist mitsamt ihrer Position am Bearbeitungskopf als Gesamtaufbau in Abb. 19 dargestellt.

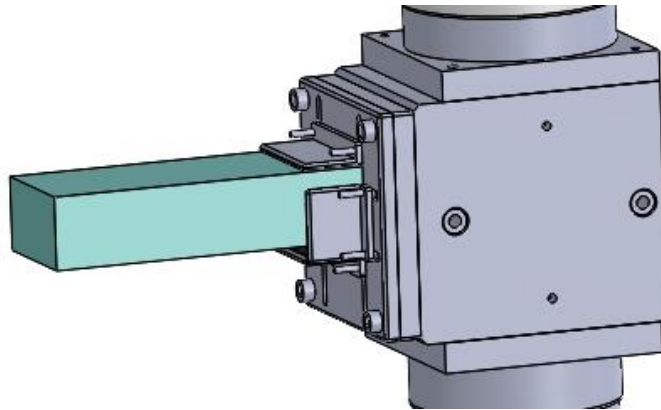


Abbildung 19: Modell der mechanischen Befestigung des Messgeräts am Bearbeitungskopf

Die Wahl auf die Laufzeitmessung fiel aufgrund des Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Interferometer weisen höhere Kosten und eine höhere Genauigkeit auf. Allerdings sind die Kosten eines Interferometers für diese Aufgabe zu hoch. Die Genauigkeit, die für diese Aufgabe notwendig ist, ist geringer als jene, die ein Interferometer erreicht. Bei SITEC gibt es Laseranlagen, an denen eine zur Probenoberfläche senkrechte Einstrahlung nicht möglich oder nicht zweckmäßig ist. Da ein Michelson-Interferometer auf einer Reflexion beruht, die dem Reflexionsgesetz entspricht, würde dies eine Messung verhindern. Die Lasertriangulation und die Laufzeitmessung hingegen beruhen auf einer diffusen Reflexion, bei der sich die verschiedenen Reflexionswinkel aufgrund der Rauheit der Oberfläche voneinander unterscheiden. Dies entspricht nur in der mikroskopischen Größenordnung dem Reflexionsgesetz. Daher können die Lasertriangulation und die Laufzeitmessung für eine schräge Einstrahlung und für raue Oberflächen eingesetzt werden.

Im Bereich der Laufzeitmessung wurden die kostengünstigsten Messgeräte gefunden. Daher wurde dieses Verfahren für erste Versuchszwecke ausgewählt. Aber um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, muss nachfolgend ein größerer finanzieller Aufwand betrieben werden. Da die Vorgabe des Selbstkostenpreises Interferometer ausschließt, wird eine Preisklasse gewählt, in der das vorteilhafteste Kosten-Nutzen-Verhältnis bei Triangulationsmessgeräten besteht.

4.3 Auswahl des Messgerätes

4.3.1 Randbedingungen

Vergleichen mit der Lösung in [1] wurde das Ziel aufgestellt, die Messgenauigkeit des Messsystems für die Fokussuche zu erhöhen. Die dafür notwendige Änderung des Messsystems kann eine Änderung eines Bauteils oder eine Änderung des Messgeräts sein. Wie unter 3.1.1 erläutert wurde, werden bei der Lasertriangulation Winkelbeziehungen zwischen einfallendem und diffus reflektiertem Strahl ausgewertet. Dies erfolgt häufig über eine CCD-Zeile [20]. Allerdings ist der Einbau einer neuen CCD-Zeile aufwändig. Daher wird ein anderes Entfernungsmessgerät zur Erhöhung der Messgenauigkeit ausgewählt.

Die fehlende Möglichkeit, diffus reflektierte Strahlung zu vermessen, ist einer der Gründe, warum keine Michelson-Interferometer ausgewählt werden. Weiterhin würde bei diesen der vorgegebene Selbstkostenpreis überschritten werden, da deren typischen Kosten im Bereich über 20000 € liegen. Ein wirtschaftliches Kriterium beinhaltet, dass der Selbstkostenpreis nicht über 3000 € betragen sollte. Das hängt damit zusammen, dass ein solches Messsystem ein Zusatzelement an einem Bearbeitungskopf ist. In den Selbstkostenpreis fließen auch die Fertigungskosten für die mechanische Integration mit ein. Das Messgerät muss in geometrischer Hinsicht und hinsichtlich der Absorption und Reflexion integrierbar sein. Zur geometrischen Integration muss der vom Messgerät durchstrahlte Bereich so groß sein, dass keine Laserstrahlung auf angrenzende Objekte trifft. In Abb. 20 sind eine x- und eine y-Richtung gekennzeichnet.



Abbildung 20: Messgerät LAS-T5 [21]

Die optischen Elemente im Bearbeitungskopf weisen eine begrenzte Reflexion und Transmission auf. Daher muss überprüft werden, ob die Messlaserstrahlung nach der Rückreflexion mit ausreichender Intensität wieder am Messgerät ankommt. Für die Lösung in [1] wurde das bereits getan. Da die Reflexions- und Transmissionsgrade allerdings wellenlängenabhängig sind, müssen diese für jede Änderung des Messgeräts neu überprüft werden, sofern sich die Wellenlänge unterscheidet. Die dadurch zustande kommenden gesamten Intensitätsverluste lassen sich aus den Transmissionsgraden aller einzelnen optischen Elemente ermitteln. Diese lassen sich aus Transmissionskurven von der Firma Trumpf Laser GmbH + Co. KG in Abhängigkeit der Wellenlänge ablesen. Nur wenn die Intensitätsverluste an den optischen Elementen so gering sind, dass diese nicht als Messobjekte interpretiert werden, ist eine erfolgreiche Messung möglich.

4.3.2 Variantenvergleich

Das OM70-11112069 der Baumer Group beruht im Gegensatz zum GLM 30, dem bisher verwendeten Messgerät, auf Lasertriangulation. Das Messgerät weist die in Tab. 3 genannten technischen Daten auf und verfügt über einen Datenausgang. Die angegebene Linearitätsabweichung gilt bis zu einer Entfernung von 200 mm. Da das OM70 Kosten von 1400 € aufweist, sind bei diesem die Preise geringer als beim Michelson-Interferometer. Dennoch wurde die Genauigkeit in den gewünschten Bereich gebracht, der laut Vorgabe von SITEC bei 0,1 mm beginnt. Damit ist es möglich, mittels der Lasertriangulation eine höhere Messgenauigkeit (siehe Tab. 3) als bisher (2,0 mm) zu erreichen. Auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist beim OM70 unter Berücksichtigung des Genauigkeitszieles vorteilhafter als beim GLM 30. In y-Richtung liegen unter Kenntnis der Tatsache, dass die Öffnung am Kameraanschluss ca. 10 mm groß ist, der Ausgang der Laserstrahlung und die Empfangseinheit zu weit auseinander, um den Beobachtungsarm zu nutzen. Ohne Beobachtungsarm stehen 50 mm zur Verfügung, von denen laut Abschätzung 30 bis 40 mm genutzt werden.

Tabelle 3: Technische Daten OM70 [22]

Wellenlänge	660 nm
Messbereich	100 bis 500 mm
Messbereich Breite	13 bis 66 mm
Linearitätsabweichung	100 μ m
Wiederholgenauigkeit	4 bis 20 μ m
Laserklasse	2
Abmessungen	26 mm x 74 mm x 55 mm

Ein weiterer Entfernungsmesser ist das LAS-T5 der Firma Waycon Positionsmesstechnik GmbH. Dessen Genauigkeitsangaben erfüllen mit zunehmender Entfernung die Vorgabe von 0,1 mm nicht mehr, jedoch wird bei einer ähnlich hohen Genauigkeit dies von SITEC akzeptiert. Dieses Messgerät verfügt ebenfalls über einen Datenausgang. Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung kann auf geringfügig über 30 mm abgeschätzt werden. Die Kosten betragen 798 € [21]. Das LAS-T5 hat die in Tab. 4 genannten technischen Daten:

Tabelle 4: Technische Daten LAS-T5-500 [21] [23]

Wellenlänge	650 nm
Messbereich	100 bis 600 mm
Linearitätsabweichung	50 bis 2000 μm
Auflösung/ Wiederholgenauigkeit	15 bis 670 μm
Messzeit	0,9 ms
Laserklasse	2
Abmessungen	20,6 mm x 65 mm x 50 mm

Von dieser Firma wurden auch das LAS-TM, was aber eine geringere Messgenauigkeit hat, und das LAS-T, bei dem aber der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung größer ist, produziert. Beim LAS-TM ist der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung kleiner als beim LAS-T5 und beim LAS-T ist die Messgenauigkeit höher als beim LAS-T5. Das LAS-T5 erfüllt sowohl näherungsweise die Genauigkeits- als auch die Geometriebedingungen, was bei den anderen beiden LAS-Varianten nicht der Fall ist. [23]

Weiterhin kann das optoNCDT 1420 der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG eingesetzt werden, das ebenfalls einen Datenausgang hat. Eine Besonderheit dieses Messgeräts sind die geringen Abmessungen, was die Integrierbarkeit erleichtert. Allerdings sind die Kosten mit 1480 € höher. Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung kann auf geringfügig über 20 mm abgeschätzt werden. In Tab. 5 werden die technischen Daten dieses Messgeräts genannt. [24]

Tabelle 5: Technische Daten optoNCDT 1420-500 [24]

Wellenlänge	670 nm
Messbereich	100 bis 600 mm
Wiederholgenauigkeit	20 bis 40 μm
Linearitätsabweichung	500 bis 1000 μm
Messrate	2 kHz
Laserklasse	2
Abmessungen	20 mm x 46 mm x 30 mm

Dass bei Messgeräten mit einem großen Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung die Messgenauigkeit höher ist, liegt daran, dass bei diesen nicht so kleine Winkel zwischen einfallender und gestreuter Strahlung entstehen. Aus diesem Grund führen auch steigende Entfernungen zu einer geringeren Messgenauigkeit. Bei kleinen Winkeln bewirkt ein bestimmter absoluter Fehler bei der Winkelmessung einen größeren relativen Fehler. Alle genannten Entfernungsmessgeräte verwenden Diodenlaser. Die in den Datenblättern genannten Messgenauigkeiten und die Kosten werden in Tab. 6 untereinander und mit einem Interferometer verglichen, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu beurteilen.

Tabelle 6: Gegenüberstellung Kosten-Messgenauigkeit

Name	Messgenauigkeit in μm	Kosten in €	Messprinzip
GLM 30	2000	53	Laufzeitmessung
LAS-T5-500	15 bis 670	798	Lasertriangulation
OM70	4 bis 20	1400	Lasertriangulation
optoNCDT 1420-500	20 bis 40	1480	Lasertriangulation
XL-80	0,5 pro Meter Entfernung [25]	22500 [25]	Michelson-Interferometer

Die hohe Genauigkeit des XL-80 ist für die Messungen nicht notwendig, sodass dieses Messgerät auch aufgrund seiner Kosten abgelehnt wird. Wenn verschiedenartige Genauigkeitsangaben in den Datenblättern stehen, von denen keine die Gesamtmessgenauigkeit darstellt, wird die Wiederholgenauigkeit unter „Messgenauigkeit in μm “ in Tab. 6 angegeben, da der Fokusabstand einmalig mit einem Entfernungsmesser ausgemessen werden kann. Dabei gilt die Richtlinie, dass bei einem Fehlen der Möglichkeit, die Strahlung in den Beobachtungsarm einzukoppeln, was bei allen Triangulationssensoren der Fall ist, die Kosten weniger als 1000 € betragen sollten. Das OM70 und das optoNCDT 1420 erfüllen diese Richtlinie nicht. Die sich aus den unter 4.3.1 erwähnten Transmissionskurven ergebenden Gesamtintensitätsverluste der in Betracht gezogenen Messgeräte sind in Tab. 7 gezeigt.

Tabelle 7: berechnete Intensitätsverluste

Laseranlagen, an denen Bearbeitungsoptik zum betrachteten Zeitpunkt in Verwendung	Intensitätsverluste in %		
	OM70	LAS-T5	optoNCDT 1420
LS 64 C, LWS-P1000	58,22	58,22	60,27
SYSLAS (später LWS-C MIFULAS)	91,21	90,49	91,72
LWS-C	89,76	88,70	90,55
LWS-DM4, -DM5	88,17	88,59	87,19
LS 108 CI	59,05	56,98	62,21

Dabei ist zu sehen, dass die Intensitätsverluste sich bei den verschiedenen Entfernungsmessern geringfügig unterscheiden, was daran liegt, dass die Unterschiede in der Wellenlänge gering sind. Trotz zum Teil signifikanter Verluste kommt ein für die Messung genügender Anteil wieder am Messgerät an. Bezüglich der Intensitätsverluste scheidet keines der betrachteten Messgeräte aus. Aufgrund der Kosten unter 1000 € bei einer Genauigkeit im Bereich unter 1 mm, die bei der Lösung in [1] nicht erreicht wurde, wird das LAS-T5 für die Messungen ausgewählt.

4.4 Versuchsaufbau und Integration des Messgeräts

4.4.1 Mechanische Integration

Randbedingungen

Die Verwendung des Beobachtungsarmes ist für diverse Bearbeitungs- und Analyseaufgaben förderlich. Daher wird versucht, das Messgerät an der Schnittstelle für Sensorik oder am Kameraanschluss nach Abb. 21 zu befestigen. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Messlaserstrahlung nicht auf ein Objekt trifft oder zu stark abgeschwächt wird. An dem Bearbeitungskopf, an dem die Messungen durchgeführt werden, ist nur der Kameraanschluss vorhanden. Die Schnittstelle für Sensorik entfällt. Der Laserschutzfilter dient dazu, dass die Laserwellenlänge in vernachlässigbarem Ausmaß transmittiert. Das sichtbare Licht kann von der Kamera verarbeitet werden. Dieser Filter wurde bei Anlagen, in denen er benutzt wird, für die Berechnung der Intensitätsverluste berücksichtigt, jedoch ist er nicht in allen Bearbeitungsköpfen vorhanden.

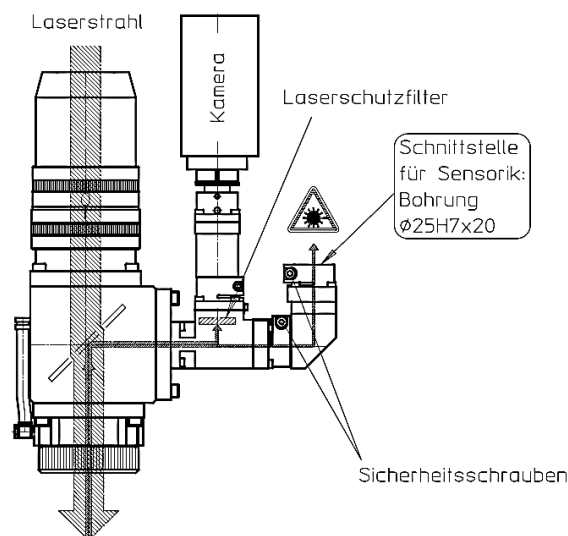


Abbildung 21: Kameraanschluss und Schnittstelle für Sensorik, aus Vorgängervariante von [18]

Wie unter 4.3.2 erwähnt wurde, besteht die Möglichkeit, die Messlaserstrahlung am Kameraanschluss oder an der Schnittstelle für Sensorik einzukoppeln, beim ausgewählten Entfernungsmessgerät aufgrund geometrischer Bedingungen nicht. Daher muss der Beobachtungsarm abmontiert und durch eine Vorrichtung ersetzt werden, die eine wiederholgenaue Positionierung des Entfernungsmessgeräts ermöglicht. Wenn ein Messgerät gefunden wird, bei dem die geometrischen Bedingungen für die Nutzung des Beobachtungsarmes erfüllt sind, hängt die Nutzbarkeit desselben von den Reflexions- und Transmissionseigenschaften ab. Im Beobachtungsarm gibt es Optiken, die für die Berechnung in Tab. 7 nicht verwendet wurden, da für diese keine Transmissionskurve vorhanden ist. Daher muss bei Verwendung des Beobachtungsarms von höheren Verlusten als in Tab. 7 ausgegangen werden.

Achsenparallele Einkopplung der Strahlung senkrecht zu Würfeloberfläche (Typ 1: Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung)

Um den Entfernungsmesser an den Bearbeitungskopf zu integrieren, muss eine mechanische Vorrichtung konstruiert werden. Dazu wurde bereits unter [1] eine Variante entworfen. Diese hat mit der jetzigen gemeinsam, dass der Entfernungsmesser von Wänden gehalten wird. Für das aktuelle Messgerät müssen die Maße dieser Vorrichtung geändert werden. Die Wände sind verstellbar, allerdings nur in einem bestimmten Bereich. Für die größeren Entfernungsmesser muss auch ein größerer Abstand einstellbar sein. Diese sind auf einer Grundplatte befestigt, auf der der Entfernungsmesser aufliegt. Die Strahlung tritt durch eine Öffnung in dieser. Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung ist größer geworden, sodass auch diese Öffnung vergrößert werden muss. In Abb. 22 wird ein Modell dieser Vorrichtung dargestellt.

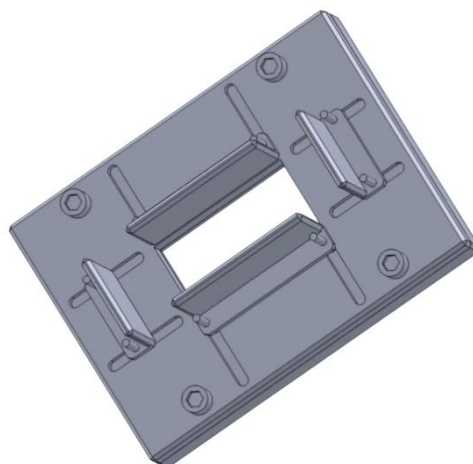


Abbildung 22: Modell einer Vorrichtung zur mechanischen Integration (senkrechte Einstrahlung)

Die in Abb. 22 gezeigte Vorrichtung wurde auf die gleiche Art wie in Abb. 19 befestigt. Die Strahlungsemission erfolgt nach dem in Abb. 23 gezeigten Prinzip.

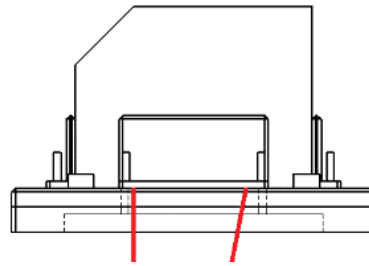


Abbildung 23: Strahlungsemission senkrechte Einstrahlung

Die in Abb. 23 gezeigte Strahlungsemission verläuft unter einem Winkel von 90° zwischen der hinlaufenden Messlaserstrahlung und der Unterkante der Vorrichtung. Daher wird diese Vorrichtung im Folgenden „Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung“ genannt.

Schräg angesetzte Seiteneinstrahlung am Beobachtungsarm vorbei (Typ 2: Vorrichtung für Seiteneinstrahlung)

Ein weiterer Ansatz zur mechanischen Integration ist die Schrägstellung des Messgeräts. Dabei muss überprüft werden, ob der Strahlengang geometrisch zur Konstruktion passt. Dazu fehlen jedoch genaue Daten über den Abstand von Ein- und Ausgang der Laserstrahlung bezüglich des Messgerätes und über die Position des Teilerspiegels im Würfel des Bearbeitungskopfes. Nach einer Abschätzung der Daten konnte allerdings festgestellt werden, dass es vermutlich funktioniert. Um das zu beweisen, muss die dazugehörige Vorrichtung, die in Abb. 24 gezeigt wird, gefertigt werden.

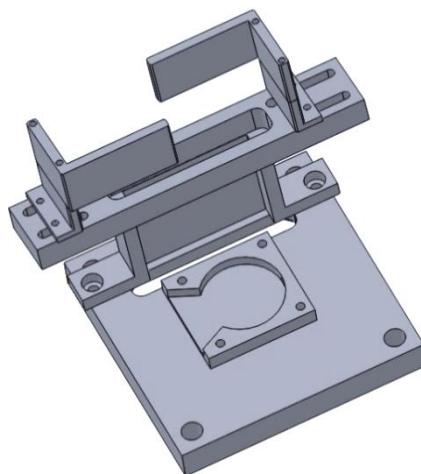


Abbildung 24: Modell der Vorrichtung zur Schrägstellung des Messgeräts (Seiteneinstrahlung)

Die in Abb. 24 gekennzeichnete Grundplatte entspricht der Konstruktion einer Platte im Bearbeitungskopf der Firma Trumpf. Sie kann nachkonstruiert werden, um die Platte der Firma Trumpf zu ersetzen. Wird hingegen direkt die Platte der Firma Trumpf bearbeitet, müssen keine neuen Optiken eingebaut werden, die nicht die gleiche Beschichtung hätten wie die von Trumpf, da das Schichtsystem von Trumpf der SITEC nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wird das Risiko eines Fehlschlages (Blockieren der Strahlung), der die Nutzbarkeit dieser Platte einschränken würde, eingegangen. Die Integration wird in Abb. 25 in Bezug auf die Strahlungsemission und in Abb. 26 in Bezug auf den mechanischen Anschluss an den Bearbeitungskopf gezeigt.

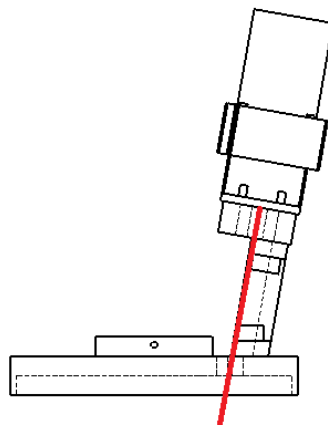


Abbildung 25: Strahlungsemission Seiteneinstrahlung

Der Winkel der rot eingezeichneten Messlaserstrahlung zur Unterkante dieser Vorrichtung beträgt für den hinlaufenden Anteil 80° . In der Einfallsebene verhält sich die rücklaufende Wellennormale zur hinlaufenden Strahlung ebenso wie bei der anderen Vorrichtung. Aufgrund der Lage der Einfallsebene heißt diese Variante „Vorrichtung für Seiteneinstrahlung“.

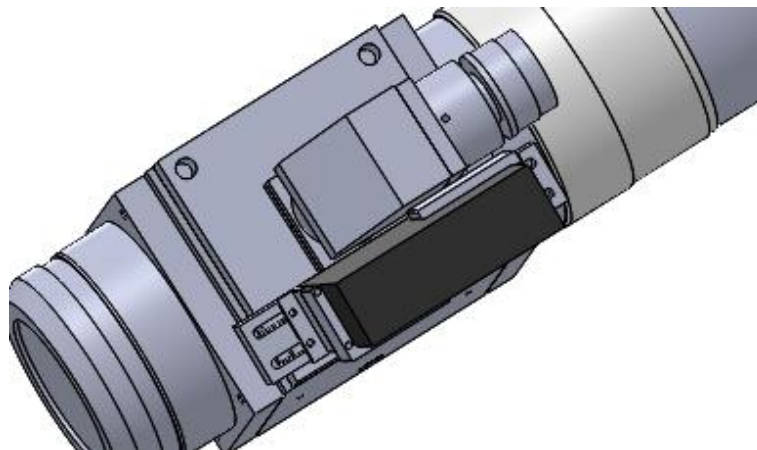


Abbildung 26: Modell der mechanischen Befestigung der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung am Bearbeitungskopf

Ein möglicher Grund für ein Blockieren der Strahlung könnte sein, dass die Abschätzung unbekannter geometrischer Daten zu unpräzise ist. Dabei besteht auch nicht die Möglichkeit, diese zu messen, da dafür eine Berührung des Teilerspiegels notwendig wäre, die eventuell eine Beschädigung desselben zur Folge hätte. Zudem können Fertigungstoleranzen die Verwendbarkeit dieser Vorrichtung beeinflussen, wenn dadurch keine präzise Positionierung von Messgerät und Vorrichtungsteilen möglich ist. Nach einer Optimierung, für die die bereits bearbeitete Platte weiterhin genutzt werden kann, erhält die Vorrichtung für Seiteneinstrahlung die in Abb. 27 gezeigte Gestalt.

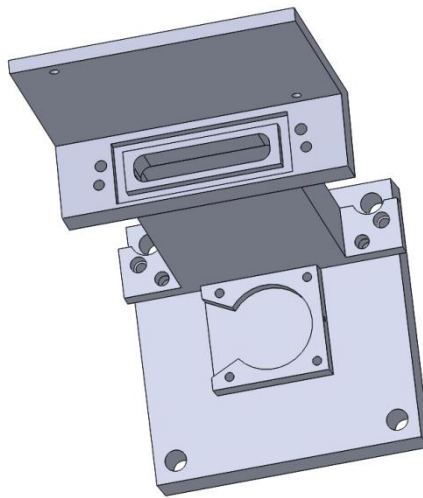


Abbildung 27: Modell der Vorrichtung zur Schrägstellung des Messgerätes optimiert

In Abb. 28 wird die Strahlungsemission gezeigt, die analog zur nicht optimierten Variante verläuft. Bei dieser beträgt der Winkel zwischen der hinlaufenden Messlaserstrahlung und der Unterkante des Messgerätes 83° . Der Grund ist eine Unterbrechung des Messbereichs, auf die im Folgenden noch eingegangen wird. Auch aus Gründen der Koaxialität ist dieser Winkel geeignet.

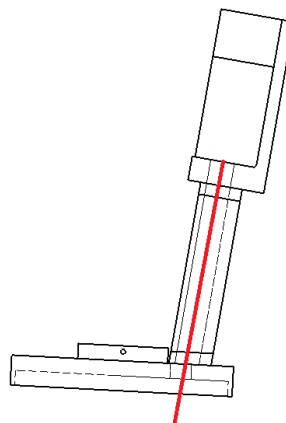


Abbildung 28: Strahlungsemission Seiteneinstrahlung optimiert

4.4.2 Steuerungstechnische Integration

Anzeige und Anschluss

Das LAS-T5 ist auf eine Spannung von 12 bis 28 V eingerichtet. Die verwendete Spannung in der Laseranlage beträgt 24 V, liegt also in diesem Bereich. Das Ausgangssignal ist linear abhängig von der gemessenen Distanz. Die maximale Signalspannung beträgt 10 V, d. h. bei dieser Spannung ist die Entfernung von 600 mm, bei der der Messbereich endet, erreicht. Eine Spannung von 0 V entspricht einer Entfernung von 100 mm, bei der der Messbereich beginnt. [23]

Mit einem Multimeter oder Datenrekorder können Spannungen und / oder Ströme gemessen werden und aus diesen kann der Messwert errechnet werden. Dabei ist es möglich, die Daten an einen Computer zu übertragen und auf diesem zu speichern. Diese Vorgaben erfüllt das TRUE-RMS-Messgerät UT61D, ein Multimeter der Firma Clas Ohlson GmbH mit USB-Anschluss. Dessen Kosten betragen 70 € und folgende technische Daten weist es auf:

Tabelle 8: TRUE-RMS-Messgerät UT61D mit USB [26]

Anzeigeart	digital
Displaytyp	LCD
Anschluss	USB & RS232
Messgenauigkeit	0,5 %
Abmessungen	180 mm x 87 mm x 47 mm
Gewicht	370 g

Das UT61E, das eine Weiterentwicklung des UT61D ist, wird für die meisten Messungen aufgrund seiner Messgenauigkeit verwendet. Dieses wird das Multimeter sein, was zur Anzeige und Verarbeitung des Messwertes verwendet wird, hat diverse Eigenschaften mit dem UT61D gemeinsam und wurde vom gleichen Hersteller produziert. Im Laufe der Messungen werden aus firmeninternen Gründen weitere Multimeter verwendet. Dazu gehören der Ironmeter der Firma HT Instruments GmbH, dessen technische Daten in Tab. 9 und der PCE-EM886 der Firma PCE Deutschland GmbH, dessen technische Daten in Tab. 10 dargestellt sind.

Tabelle 9: TRMS-Multimeter Ironmeter [27]

Anzeigeart	digital
Displaytyp	LCD
Anschluss	nicht vorhanden
Messgenauigkeit	1 %
Abmessungen	120 mm x 65 mm x 44 mm
Gewicht	200 g

Tabelle 10: Auto-Ranging Multimeter PCE-EM886 [28]

Anzeigeart	digital
Displaytyp	LCD
Anschluss	Nicht vorhanden
Messgenauigkeit	1 %
Abmessungen	170 mm x 78 mm x 48 mm
Gewicht	335 g

Die vom UT61E gemessene Spannung kann über ein USB-Interface-Kabel an einen Computer übertragen werden [26]. Die dortige Software wird daraufhin programmiert, dass die Spannung gemäß der Kennlinie umgerechnet wird. Der so erhaltene Abstandsmesswert wird zum einen an die Anzeigeeinheit oder an das Anzeigefenster und zum anderen an die Steuerung ausgegeben. Die Übertragung erfolgt über eine USB- oder SPS-Schnittstelle.

Kalibrierung und Referenzierung

Die Steuerung der Achsen der Laseranlage erfolgt über eine Programmierung. Wenn die Messdaten an einen Computer übertragen werden, können diese in MATLAB importiert werden. Der Mittelwert aus den Messwerten für eine Probe im Fokus dient dabei als Nullreferenz. Demzufolge wird dieser Wert von allen Messwerten abgezogen. Die Z-Achse wird entsprechend der Messwerte gesteuert. Dies erfolgt durch eine Fallunterscheidung. Ist das Messergebnis negativ, wird der Bearbeitungskopf entlang der Z-Achse nach oben verschoben. Bei einem positiven Messergebnis wird er nach unten verschoben. Gleichzeitig wird der nach Abzug des Fokusabstands erhaltene Messwert an eine Anzeige ausgegeben. Da bei SITEC das Programm MATLAB nicht verfügbar ist, muss das durch MATLAB erzeugte Programm eigenständig arbeiten können. Anschließend muss es in die CNC-Steuerung integriert werden. Die MATLAB-Befehle müssen so angelegt sein, dass eine Veränderung der Ausgabe des Programms auch ohne eine Änderung der MATLAB-Befehle möglich ist. Daher werden die MATLAB-Befehle in Programmeingaben transformiert. Die Ausgabe des Programms wird dann in M-Befehle für die CNC-Steuerung transformiert.

Folgender Algorithmus generiert das in Abb. 29 gezeigte Ausgabefenster: Der z-Wert am Anfang entspricht dem Messwert, der sich aus dem importierten Messwert ergibt, wenn das Messsystem auf den Fokusabstand genullt wird. Hingegen tritt der z-Wert am Ende nach der Einstellung des Fokusabstandes auf die Probe für ein genulltes Messsystem auf. Durch In- und Dekrementierungen wird das realisiert. Demzufolge beträgt er bei einem funktionierenden System stets null und wird im Grafikfenster zur Kontrolle angezeigt. Die manuelle Eingabe ist als zusätzliche Option gedacht, falls die automatisierte Variante nicht umgesetzt werden kann. Bei der nicht manuellen Variante wird der Messwert in einer TXT-Datei eingegeben und in das Programm geladen.

Messwert	20
z-Wert Anfang	-430
z-Wert Ende	2.9268e-11
manuell	<input checked="" type="checkbox"/>
Anzahl 100 µm nach oben	4300
Anzahl 100 µm nach unten	0

Abbildung 29: Ausgabe für Steuerung der Laserachsen nach Erweiterung

Alle Daten werden in Millimeter angezeigt. Um den jeweils ausgegebenen Messwert zu berechnen, muss das MATLAB-Skript die Kennlinie enthalten. Der aus dem anderen Programm importierte Messwert beschreibt die Spannung, während der angezeigte Messwert für die Entfernung steht. Die Kalibrierung der Z-Achse auf die Probe im Fokusabstand erfordert eine Übereinstimmung von der Größe der Dekrementierungen im Programm und der Schrittweite der Steuerung. Beide sind variierbar und sollten angepasst an die angestrebte Genauigkeit höchstens 0,1 mm betragen.

Die Möglichkeit, dies als EXE-Datei zu speichern, besteht und mittels des MATLAB Compilers lässt sie sich theoretisch ausführen. Dieser ist ein Programm, was dafür gedacht ist, ausführbare mit MATLAB geschriebene Dateien weitergeben zu können. Der MATLAB Compiler kann ebenfalls weitergegeben werden, ohne dass allgemein Lizenzgebühren anfallen. Bei der kommerziellen Nutzung würden jedoch Lizenzgebühren anfallen, die aus firmeninternen Gründen nicht investiert werden.

Das grundlegende Vorgehen kann auf andere Programmiersprachen angewendet werden. Als Beispiel von Programmiersprachen, die sich dafür eignen, ist Python zu nennen. Ebenso vielseitig sind die Möglichkeiten der Verknüpfung von Software und Steuerung. So ist die FPGA-Technologie zu nennen. Auch ein Feldbus-Anschluss könnte hierfür eingesetzt werden. Diese Technologie wurde bereits für eine ähnliche Zielstellung eingesetzt, bei der auch anhand von Entfernungsmesswerten in die Steuerung der Z-Achse eingegriffen wurde. Diese Entfernungsmesswerte wurden allerdings kapazitiv aufgenommen. Weitere Ansätze befinden sich im Bereich der mikrocontrollerorientierten Lösungen. Die bei MATLAB erzeugte Variante ist als Konzept für die Kalibrierung und Referenzierung zu betrachten mit dem Ziel, bei nachfolgenden Untersuchungen dieses auf andere Umsetzungsvarianten anzuwenden.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ergebnisse für die Integration

Durch die Fertigung der Vorrichtungen wurde eine weitgehend stabile und die Funktion des Messgeräts nicht einschränkende Befestigung des Messgeräts geschaffen. Eine leichte Positionsschwankung des Messgeräts ist jedoch möglich, wenn die Wände vor der Befestigung ohne Hilfsmittel bewegt werden und nicht die optimierte Variante der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung benutzt wird. Dies hat einen Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit und wurde für die nachfolgenden Messungen durch Klemmungen geometrischer Körper unterbunden. Die Abb. 30 und 31 zeigen den Messaufbau an der Laseranlage mit den beiden Vorrichtungen ohne Verwendung der optimierten Variante der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung. Aufgrund der Fertigungskosten wurde diese nicht vor dem Testen der anderen Vorrichtungen gefertigt.

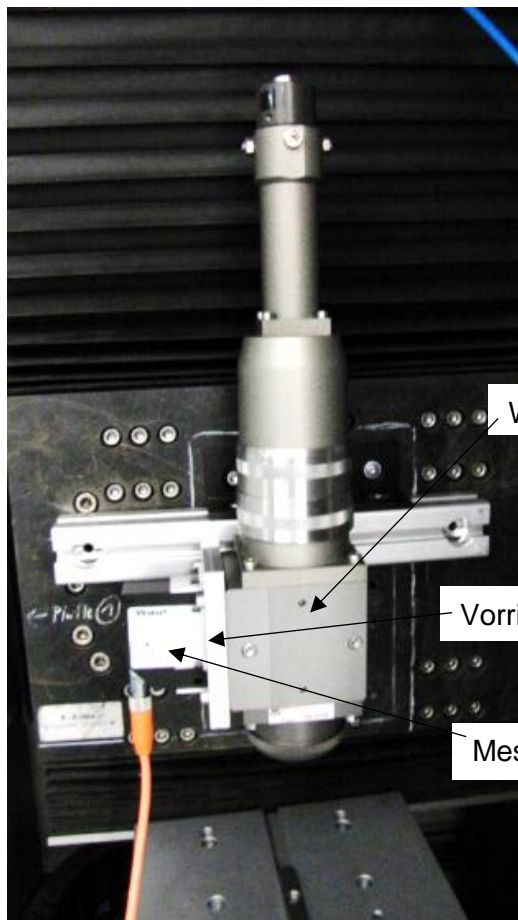


Abbildung 30: Versuchsaufbau an der Laseranlage mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung

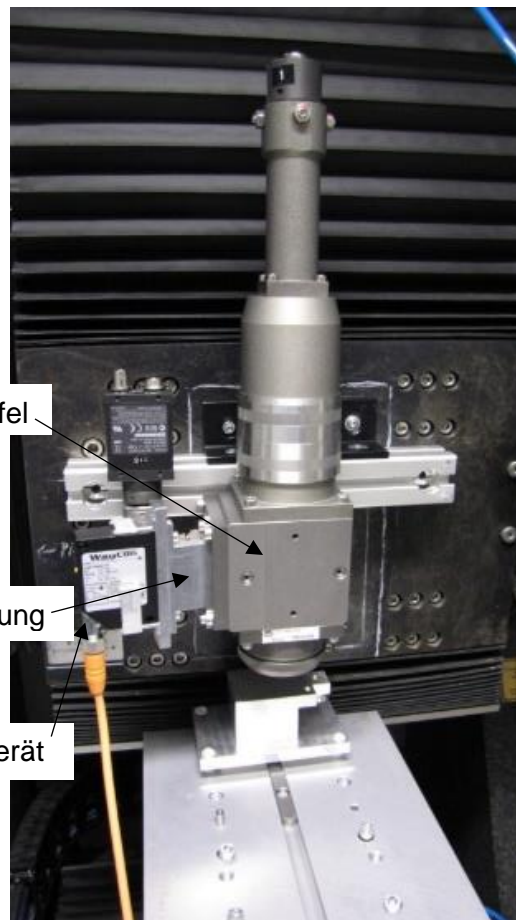


Abbildung 31: Versuchsaufbau an der Laseranlage mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung

In den folgenden Kapiteln ist in den Diagrammen die Entfernung dargestellt, die sich mitsamt dem Weg durch den Bearbeitungskopf ergibt. Dieser beträgt bei der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung 176,55 mm und bei der Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung 138,74 mm. Bis zur Referenzkante sind das 134,05 mm (Seiteneinstrahlung) und 96,24 mm (senkrechte Einstrahlung). Diese Entfernungen wurden mit dem Entfernungsmessgerät ohne Objektiv bis zu einer Kante gemessen, die gemäß einer Messung mit dem Messschieber 5,0 mm von der Referenzkante entfernt liegt. Auch die Länge der Halterung für Objektiv und Schutzglas wurde mit dem Messschieber gemessen und beträgt 42,5 mm.

5.2 Messergebnisse

5.2.1 Erkennbarkeit der Entfernungen

Die Messung kann auf metallischen Oberflächen erfolgreich durchgeführt werden. Dies gilt auch, wenn die Messlaserstrahlung durch den Bearbeitungskopf geführt wird. Jedoch ist bei der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung der Messbereich zum Teil unterbrochen, wenn nicht die optimierte Variante genutzt wird. Bei einer Veränderung des Abstandes ändert sich der Winkel des rückgestreuten Strahlungsanteils, der vom Detektor ausgewertet wird. Das führt dazu, dass die Messlaserstrahlung in manchen Fällen auf ein Hindernis trifft oder einen Weg mit unzureichender Transmission durch die optischen Bauelemente nimmt. Bei der optimierten Variante der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung wurde der Winkel verändert, um den das Messgerät schräg gestellt wird. Dadurch verändert sich auch dieses Verhalten dahingehend, dass keine Störungen der Messung mehr erfolgen. Das wurde bei der gleichen Winkeländerung bei der nicht optimierten Variante unter Ausnutzung der Fertigungstoleranzen beobachtet.

Die Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes verfälscht die Kennlinie für die Entfernungsmessung. Die maximale Spannung von 10 V wird bei geringeren Entfernungen erreicht als die, in der ein Werkstück positioniert werden muss, damit sich der Fokus auf diesem befindet. Dieses Phänomen tritt nicht auf, wenn das Objektiv entfernt wird. Jedoch ist diese Maßnahme im Produktionsbetrieb nicht geeignet, da das Objektiv den Fokus erzeugt. Erklärt werden kann dieses Phänomen dadurch, dass durch die Brechung am Objektiv die Messlaserstrahlung woanders und in einem anderen Winkel auf den Detektor trifft als es nach Gleichung 7 der Fall wäre. Eine Simulation dieses Strahlengangs wird in Abb. 32 gezeigt und für eine Brennweite von 280 mm getätigt.

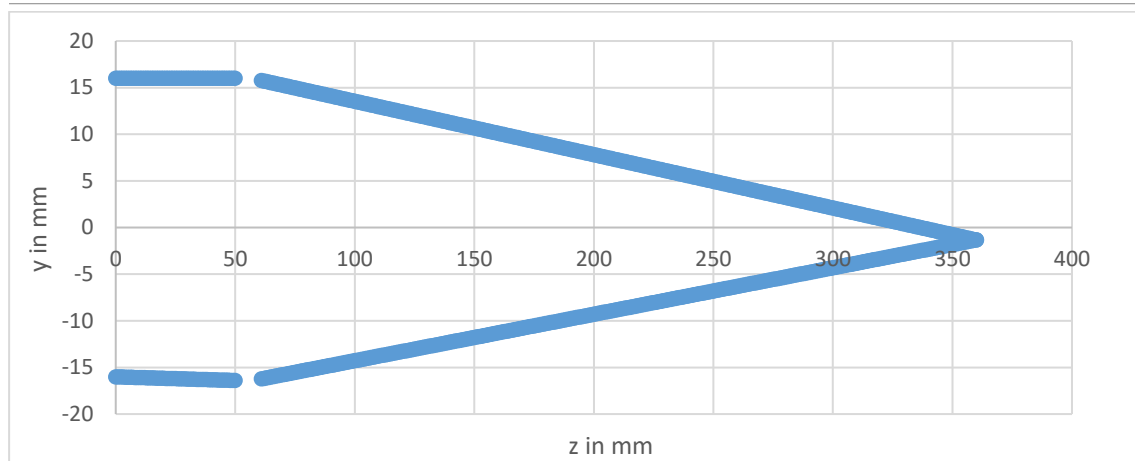


Abbildung 32: Simulation der Brechung der Messlaserstrahlung

Dadurch wird gezeigt, dass es unter den im Folgenden erläuterten Annahmen nicht möglich ist, den Fokusabstand auszumessen. Bei einer Überschreitung des Fokusabstands gelangt die Laserstrahlung auf die andere Seite der optischen Achse. Der rückreflektierte Streuanteil, der ausgewertet wird, hat dann einen kleineren Winkel zur optischen Achse. Er wird durch die Linse konvergent gebrochen. Die meisten Auswertungsverfahren erfordern divergent verlaufende Strahlung. Aufgrund des Betriebsgeheimnisses bei der Firma Waycon liegen keine Informationen darüber vor, ob das Auswertungsverfahren des LAS-T5 auch divergent verlaufende Strahlung benötigt. Daher wird die Messbarkeit des Fokusabstandes experimentell überprüft. Für die Simulation wurde die unter 3.2 vorgestellte Matrizenmethode angewendet. Durch diese lässt sich zeigen, dass durch die Verkürzung der Brennweiten der abgezogene Wert zwar verringert werden kann, es jedoch bei einem konvergenten Verlauf zur hinlaufenden Strahlung nach der Rückreflexion bleibt. Bei einem Objekt jenseits der Brennweite trifft die einfallende Strahlung auf der anderen Seite der optischen Achse auf als sie aus dem Messgerät austritt. Die Folge ist, dass der Winkel der detektierten Streustrahlung zwischen der Linse und der Werkstückoberfläche geringer ist als jener der einfallenden Strahlung. Nach einer erneuten Brechung durch die Linse verläuft die gestreute Strahlung zwischen der Linse und dem Messgerät Richtung Mittelpunkt des Messgeräts. Dies ist gegensätzlich zum typischen Betrieb dieses Messgeräts.

Ein Ansatz für eine zweckmäßige Verwendung des LAS-T5 trotz des durch den Einfluss der Fokussierlinse verkürzten Messbereiches ist die Vermessung eines Abstandes, bei dem vom Fokusabstand ein frei gewählter Abstand abgezogen wurde. Nachdem die Laserachsen auf diesen Abstand automatisch eingestellt wurden, werden sie in diesem Fall noch zusätzlich um den vom Fokusabstand abgezogenen Abstandverfahren.

Eine weitere Einschränkung besteht dadurch, dass die Einstrahlung der Messlaserstrahlung nur auf eine Art erfolgen kann, bei der die Messlaserstrahlung nicht koaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung ist. Andernfalls würde die rückreflektierte Strahlung aufgrund eines durch die Geometrie des Bearbeitungskopfes bedingten Hindernisses nicht am Detektor ankommen. In Abb. 33 ist das skizziert.

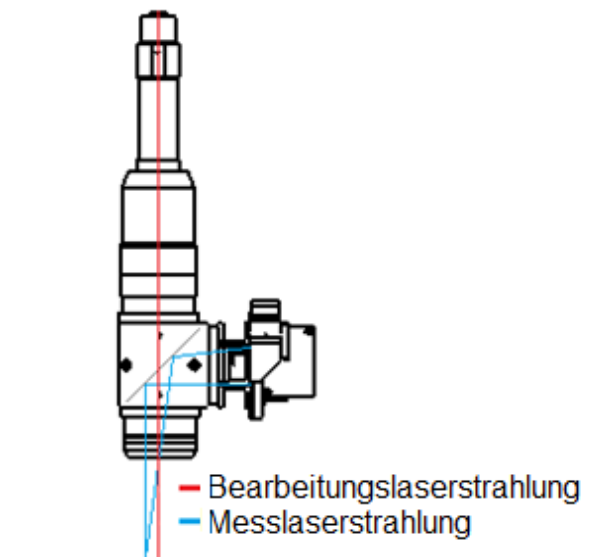


Abbildung 33: Schema für fehlende Koaxialität

Das Ziel der Koaxialität ist die Detektion von Unebenheiten und Krümmungen in Echtzeit. Dies ist auch der Grund, aus dem die Messlaserstrahlung durch den Bearbeitungskopf geführt wird. Durch die Führung der Messlaserstrahlung neben dem Bearbeitungskopf ist es nicht mehr nötig, einen bestimmten Abstand vom Fokusabstand abzuziehen und diesen auszumessen. In diesem Fall wird das Messsystem auch universeller einsetzbar, da nicht alle bei SITEC verwendeten Laseranlagen über eine Achssteuerung verfügen. Außerdem wurde gezeigt, dass bei der nicht optimierten Variante der Seiteneinstrahlung eine Unterbrechung des Messbereiches besteht, da bei einigen Entfernungen die Messung mit dieser Vorrichtung gestört wird. Bei einer Einstrahlung neben dem Bearbeitungskopf entlang besteht dieses Phänomen nicht. Das entspricht dem Prinzip von Abb. 3. Der ansonsten realisierte Aufbau mit einer Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes entspricht dem Prinzip in Abb. 4.

Der Nachteil einer Nichtdurchstrahlung des Bearbeitungskopfes ist jedoch, dass die Anpassung der Fokuslage nicht in Echtzeit erfolgen kann, da dann die Messlaserstrahlung nicht coaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung ist. Zwar wurde gezeigt, dass die fehlende Koaxialität auch bei einer Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes besteht, allerdings ist dabei die Entfernung zwischen den Wellennormalen geringer. Dadurch ist am Auftreffpunkt der Laserstrahlung die Abweichung der Höhe der Werkstückoberfläche vom Fokus bei leichten Krümmungen oder Schrägstellungen gering.

5.2.2 Kennlinienaufnahme

Kennlinienaufnahme an der Laseranlage

Um innerhalb des verkürzten Messbereiches die Entfernungsmessung korrekt auswerten zu können, wird eine neue Kennlinie aufgenommen. Für erste Testzwecke wird an einem auf einem Tisch liegenden Demonstrator aus Messwerten ohne Objektiv die Entfernung berechnet und dann die dazugehörige Spannung mit Objektiv gemessen. Durch eine Regression kann eine Gleichung ermittelt werden, die die Kennlinie beschreibt, wie Abb. 34 zeigt. Die lineare Kennlinie ist bei einer Brechung durch die Linse nicht mehr gültig. Mit einer Exponentialfunktion wird der Zusammenhang angenähert, da die exakte Gleichung komplex ist. Anhand des Bestimmtheitsmaßes wurde entschieden, dass die Exponentialform für eine Näherung geeignet ist. Der Strahlengang kann gemäß Gleichung (7) berechnet werden. Das genaue Auswerteverfahren beim Auftreffen der Strahlung auf den Detektor ist nur so weit bekannt, wie es bei der Lasertriangulation vereinheitlicht ist. Eine genaue Berechnung würde die Kenntnis der von verschiedenen Firmen unterschiedlich realisierten Details erfordern. Diese unterliegen bei der Firma Waycon dem Betriebsgeheimnis.

Die am Demonstrator aufgenommenen Kennlinien werden durch eine Messung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS präzisiert. Ein ständiger Vergleich mit dem Messwert ohne Fokussierlinse ist in diesem Fall nicht mehr nötig, da die Entfernung durch das Verfahren der Achsen gesteuert werden kann. Die Verfahrensgenauigkeit der Achsen liegt im μm -Bereich. Bei einem Entfernen der Fokussierlinse, was bei einem nicht an der Laseranlage befestigten Demonstrator nötig ist, kann es hingegen zu einer ungewollten Bewegung des Bearbeitungskopfes kommen. Daher ist davon auszugehen, dass die Messergebnisse an der Laseranlage genauer sind. Außerdem entspricht die Messung an der Laseranlage den Bedingungen, die im Produktionsbetrieb bestehen. Die in den Abb. 34 und 35 gezeigten Diagramme entstanden für eine Brennweite von 280 mm.

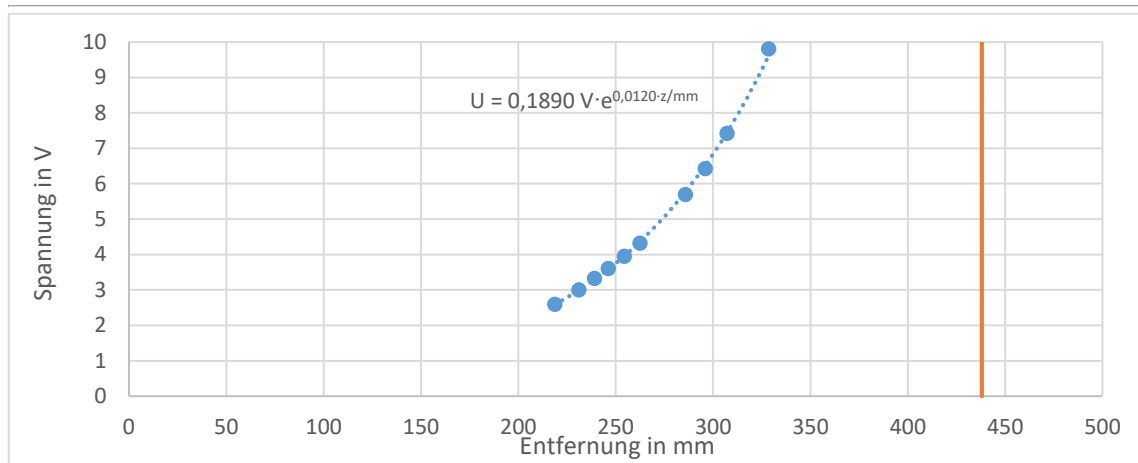


Abbildung 34: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Die bereits genannte Störung der Messungen bei bestimmten Entfernungen hat zu den unterschiedlichen Abständen geführt, die zwischen den Entfernungen bestehen, für die die Spannungen gemessen wurden, wie Abb. 34 zeigt. Im Diagramm sind keine Fehlerindikatoren dargestellt, da diese bei einer Wiederholgenauigkeit von 5 mV nicht erkennbar wären. Diese Wiederholgenauigkeit ergibt sich aus dem Diagramm im Datenblatt. Laut diesem beträgt für Entfernungen unter 350 mm die Wiederholgenauigkeit 250 μm für eine lineare Kennlinie [23]. Die orangefarbene Linie ist an der Stelle eingezeichnet, an der sich das Werkstück im Fokus befinden würde. Für die Brennweite von 280 mm wird auch eine Kennlinie für die Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung aufgenommen, wie Abb. 35 zeigt.

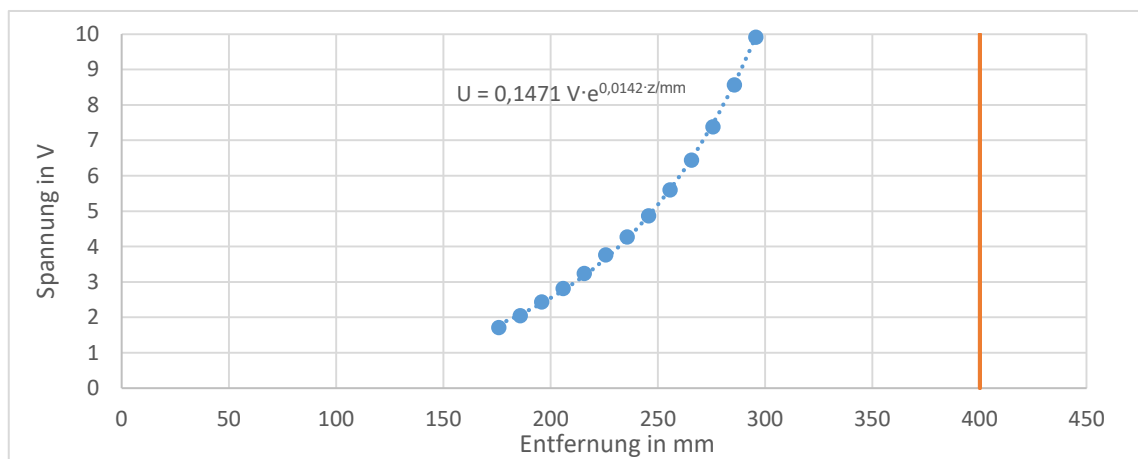


Abbildung 35: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Dabei ist zu erkennen, dass der Vorfaktor bei dieser geringer und der Vorfaktor im Exponenten (im Folgenden kurz „Exponent“ genannt) höher ist. Die Vorrichtung für Seiteneinstrahlung wurde so konstruiert, dass die Strahlung vor der Linse einen größeren Weg zurücklegt. Das verschiebt die Kennlinie nach rechts. Der Exponent wird somit kleiner. Da der Verlauf nicht abgeflacht wird, zieht das einen größeren Vorfaktor nach sich. Die Tatsache, dass die Brechung an der Fokussierlinse (Objektiv) den Messbereich so stark begrenzt, dass der Fokusabstand nicht ausgemessen werden kann, erfordert folgende Maßnahme: Statt einer Fokussierlinse mit einer Brennweite von 280 mm werden Fokussierlinsen mit Brennweiten von 200 mm und 150 mm verwendet. Nur wenn konvergent zur hinlaufenden Strahlung verlaufende rückreflektierte Strahlung ausgewertet werden kann, ist diese Methode erfolgreich. Durch die verkürzte Brennweite liegt der Fokus näher am Bearbeitungskopf. Allerdings ändert sich dann auch das Ausmaß der Beeinflussung durch die Fokussierlinse. Dies wird in Abb. 36 näher untersucht.

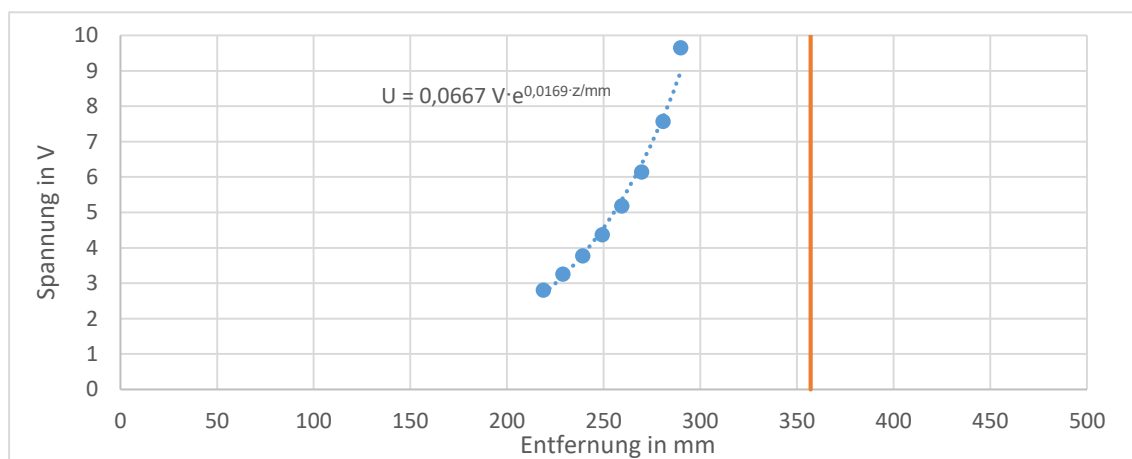


Abbildung 36: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Bei der Messung mit einer geringeren Brennweite wurde entsprechend der Erwartungen eine erhöhte Beeinflussung durch die Fokussierlinse festgestellt. Jedoch fällt dieser Effekt geringer aus als der Unterschied zwischen den Brennweiten, wie Abb. 36 zeigt. Allgemein werden die Kennlinien für kleinere Brennweiten nach links und für die Vorrichtung für Seiteneinstrahlung nach rechts verschoben werden. Mitunter werden die Kennlinien auch leicht gestreckt oder gestaucht.

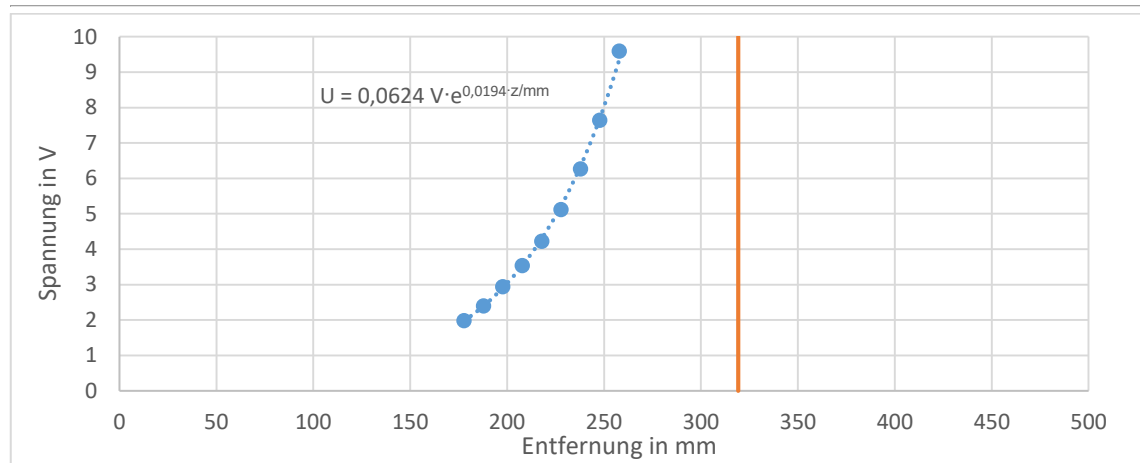


Abbildung 37: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200 \text{ mm}$ mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Die Vorfaktoren weichen prozentual bei den in den Abb. 36 und 37 gezeigten Ergebnissen weniger stark voneinander ab als bei einer Brennweite von 280 mm . Die unterschiedlich großen Exponenten bewirken somit einen größeren relativen Unterschied bezüglich der Entfernung, bei der die Grenze des Messbereiches erreicht ist. Dies ist plausibel, da der Wegunterschied zwischen den beiden Vorrichtungen konstant ist. Durch die stärkere Brechung wird der Weg kürzer, nachdem die Grenze des Messbereiches erreicht ist. Eine Brennweite von 150 mm lieferte die in den Abb. 38 und 39 gezeigten Ergebnisse.

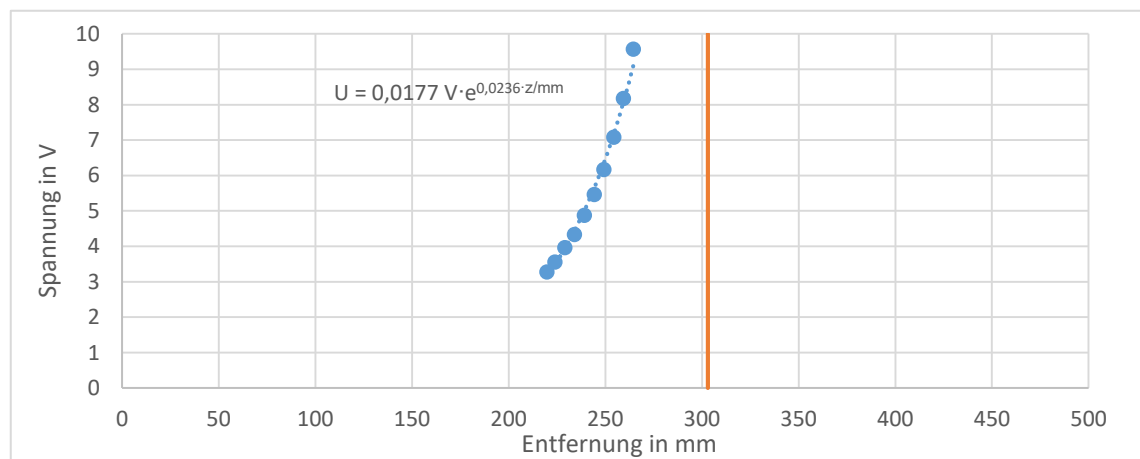


Abbildung 38: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150 \text{ mm}$ mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Ebenso wie bei einer Brennweite von 200 mm zeigt sich dabei, dass der Vorfaktor für sinkende Brennweiten sinkt. Der Exponent steigt hingegen. Insgesamt führt das zu einem Ende des Messbereiches bei noch geringeren Entfernungen. Dies ist für die Vorrichtung für Seiteneinstrahlung auch bei einer Brennweite von 150 mm bei geringeren Entfernungen der Fall als solchen, bei denen die Entfernung von der Fokussierlinse zur Werkstückoberfläche weniger als 150 mm betragen würde.

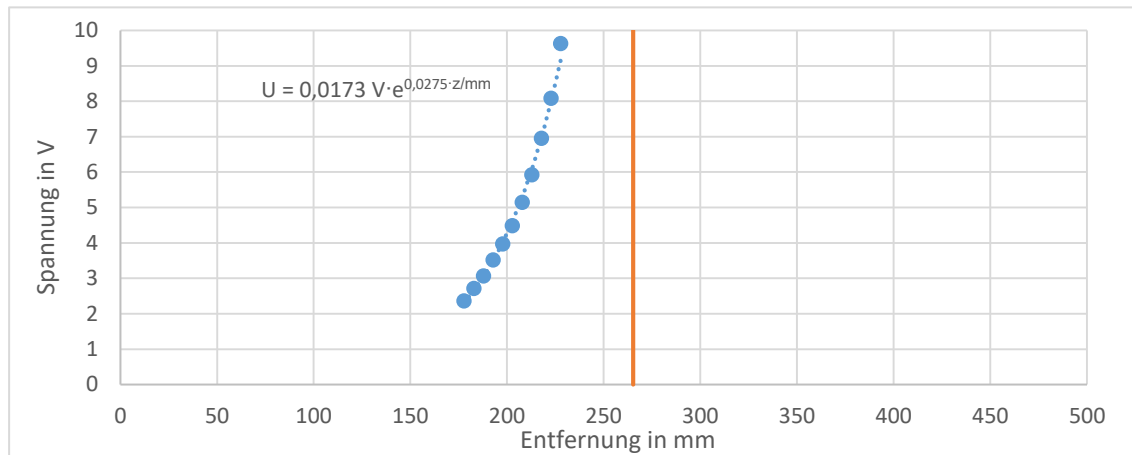


Abbildung 39: Kennlinienaufnahme an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150 \text{ mm}$ mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Bei dieser Brennweite weichen die Vorfaktoren weniger stark voneinander ab als bei einer Brennweite von 280 mm oder 200 mm. Das gilt auch für die relative Abweichung. Das Ende des Messbereiches bei noch geringeren Entfernungen verhindert, dass bei dieser Brennweite eine Vermessung des Fokusabstandes möglich ist. Das deckt sich damit, dass bei der Simulation in Abb. 32 Indizien dafür gefunden wurden, dass bei keiner Brennweite eine Messung des Fokusabstandes möglich ist. Dabei wurde davon ausgegangen, dass bei einer Konvergenz zwischen hin- und rücklaufender Strahlung keine Messung möglich ist. In diesem Fall wirkt die orangefarbene Linie in den Diagrammen als Asymptote, was ein weiteres Indiz dafür ist.

Die an der Laseranlage aufgenommenen Kennlinien unterscheiden sich bezüglich der Parameter von denen, die am Demonstrator aufgenommen wurden, hier aber nicht mit aufgeführt werden. Diese Unterschiede deuten auf Ungenauigkeiten in der Methode, um die Kennlinie aufzunehmen, hin. Dabei wurde der Winkel zur optischen Achse berücksichtigt, allerdings erst ab dem Nullpunkt der Z-Achse. Im Allgemeinen wurde beim Wechsel auf die Messung an der Laseranlage bei Seiteneinstrahlung festgestellt, dass die Kurve leicht nach rechts verschoben wurde. Das gilt vor allem für die Messung bei 150 mm, die als einzige Messung zur Kennlinienaufnahme an der Laseranlage bei der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung mit Schutzglas getätigt werden konnte.

Durch das Schutzglas kommt es zu einem Versatz und damit zu einer Verlängerung des Weges. Diese Messung kommt aber den Bedingungen im Produktionsbetrieb am nächsten, da dabei ein Schutzglas eingesetzt wird. Bei senkrechter Einstrahlung wurde die Kurve einerseits nach links verschoben, aber in y-Richtung gestaucht. An der Laseranlage ist die Rechtwinkligkeit der Einstrahlung präziser erfüllt. Das verkürzt den Weg (Verschiebung nach links) und verändert den Durchlauf durch die Linse (Stauchung).

Für die Messungen wurde das Multimeter PCE-EM886 verwendet. Mit diesem Multimeter wird auch die Standardabweichung an der Laseranlage gemessen. Die unterschiedlichen Multimeter erschweren den Vergleich verschiedener Messreihen. Die Standardabweichung verändert sich in eine explizite Richtung, die von der Messgenauigkeit des Multimeters abhängt. Bei der Messung der Standardabweichung ist die Messgenauigkeit des Multimeters daher einflussreicher als bei der Kennlinienaufnahme.

Diskussion der Kennlinie

Wie bereits erwähnt wurde, ist die exponentielle Kennlinie eine Näherung. Das zeigt die Erweiterung einer Messreihe in Abb. 40 verglichen mit der ursprünglichen Messreihe.

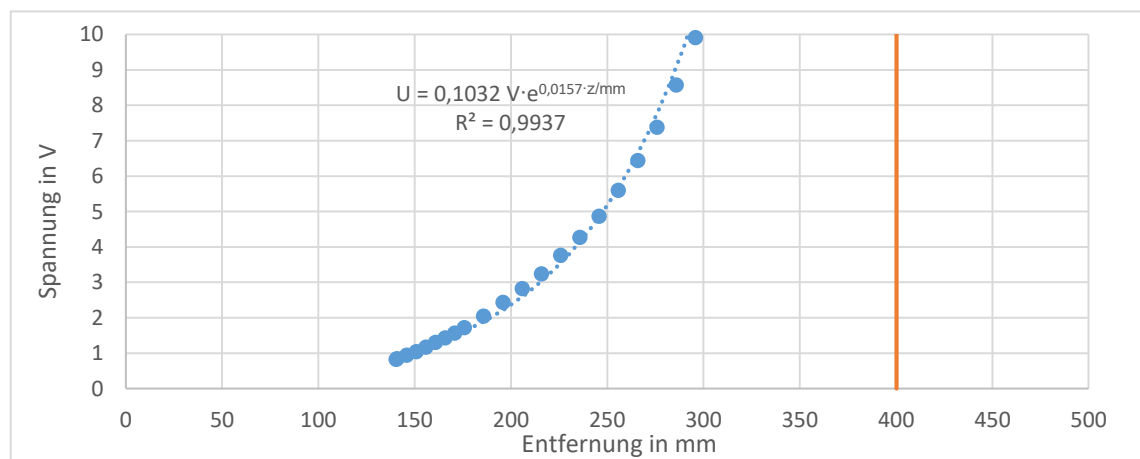


Abbildung 40: exponentielle Kennlinie an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Der Vorfaktor ist von $0,1471$ V auf $0,1032$ V gesunken und der Exponent hat sich von $0,0142 \text{ mm}^{-1}$ auf $0,0157 \text{ mm}^{-1}$ erhöht. In Abb. 41 wurde eine Potenzfunktion genutzt.

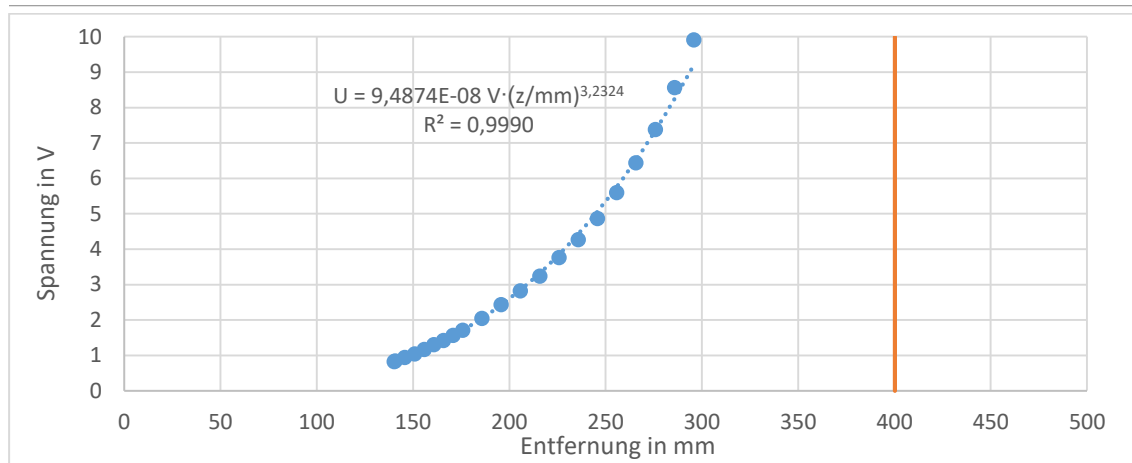


Abbildung 41: Kennlinie als Potenzfunktion an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280 \text{ mm}$ mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2 oder R) fiel die Entscheidung auf die exponentielle Kennlinie. Dieses ist aber unter diesen Umständen für die exponentielle Variante geringer als für die Potenzfunktion. Bei einer polynomischen Kennlinie kann das Bestimmtheitsmaß durch den Grad des Polynoms beeinflusst werden. So weist ein erhöhter Grad auch ein erhöhtes Bestimmtheitsmaß auf, was weit höher liegen kann als bei einer Potenzfunktion, wie in Abb. 42 zu sehen ist.

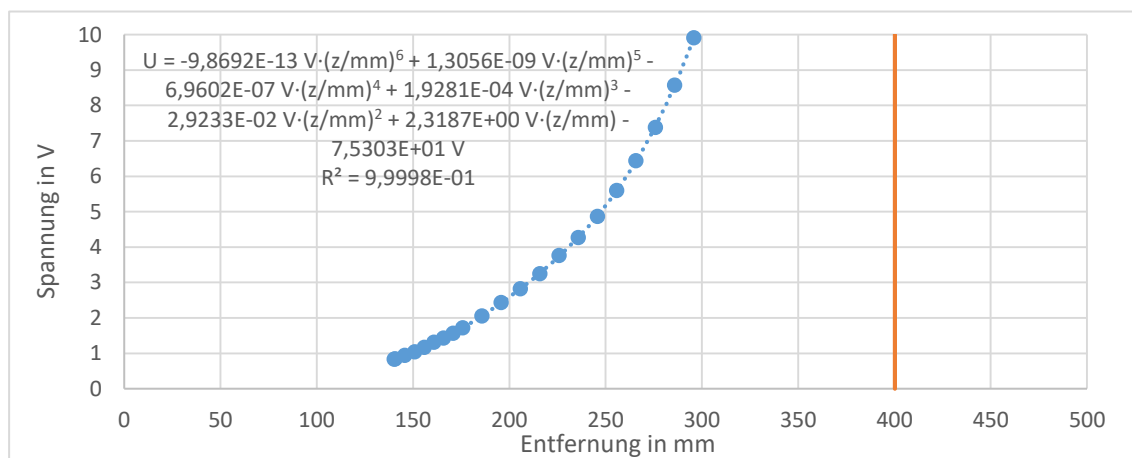


Abbildung 42: polynomische Kennlinie vierten Grades an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280 \text{ mm}$ mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit Fokusabstand (orangefarbene Asymptote)

Auch wenn aufgrund des Betriebsgeheimnisses bei der Firma Waycon keine exakte Kennliniengleichung hergeleitet werden kann, gibt es diverse Indizien dafür, dass die exponentielle Kennliniengleichung nicht die exakte Gleichung ist. Die Bestimmtheitsmaße der anderen Kennlinienarten sprechen trotz ihrer Werte nahe an eins nicht dafür, dass eine dieser Kennlinienarten die exakte Gleichung ist. Ob die Abweichungen des Bestimmtheitsmaßes von eins auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind, kann nicht abgelesen werden.

Eine polynomische Kennlinie höheren Grades weist fast immer ein hohes Bestimmtheitsmaß bei verschiedenen physikalischen Messungen auf. Dies sagt allerdings nichts darüber aus, ob es sich bei der exakten Kennlinie um eine polynomische Funktion handelt. Allerdings ist davon auszugehen, dass die reale Kennlinie eine Verkettung mehrerer verschiedener Gleichungsarten ist. Durch den mehrmaligen Durchlauf der Fokussierlinse und den Versatz an anderen optischen Elementen (z. B. Schutzglas) kommen mehrere Gleichungsanteile hinzu. Weiterhin ist zu erwarten, dass das Auswerteverfahren wiederum mehrere Gleichungsanteile erzeugt. Im Rahmen des Betriebsgeheimnisses der Firma Waycon konnte diese angegeben, dass sowohl der Winkel, unter dem die Wellennormale auf den Detektor trifft, als auch die Position der räumlichen Spitzenintensität den ausgegebenen Messwert direkt beeinflussen.

5.2.3 Standardabweichung bei wiederholter Messung

Standardabweichung bei Messung an der Laseranlage

Als Maß für die Wiederholgenauigkeit kann die Standardabweichung für wiederholte Messungen (in dieser Arbeit jeweils zehn) aufgenommen werden. Diese ist im Gegensatz zur Wiederholgenauigkeit kein maximales, sondern ein mittleres Maß für die Abweichungen der Messwerte voneinander. Eine Messung der Standardabweichung an einem auf einem Tisch liegenden Demonstrator dient der ersten Einschätzung der Messgenauigkeit des Messsystems. Jedoch ist diese Methode empfindlich gegenüber Erschütterungen. Daher wird die Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS gemessen. Dies wird in den Abb. 43 und 44 für eine Brennweite von 280 mm dargestellt.

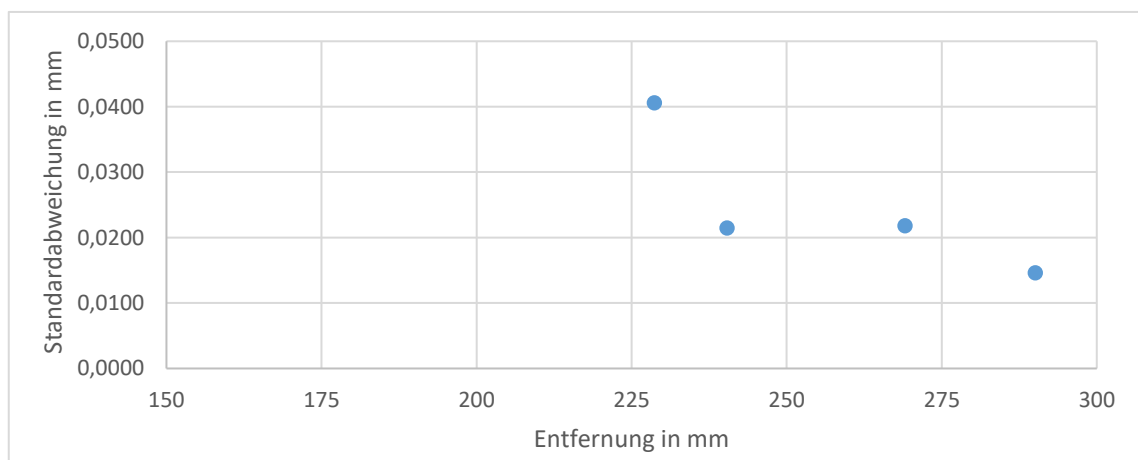


Abbildung 43: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung

Die Messreihen in Abb. 43 zeigen insgesamt eine Verringerung der Standardabweichung für steigende Entfernungen. Dies kann auf die exponentielle Kennlinie zurückzuführen sein. Dies wird im Folgenden noch näher erläutert.

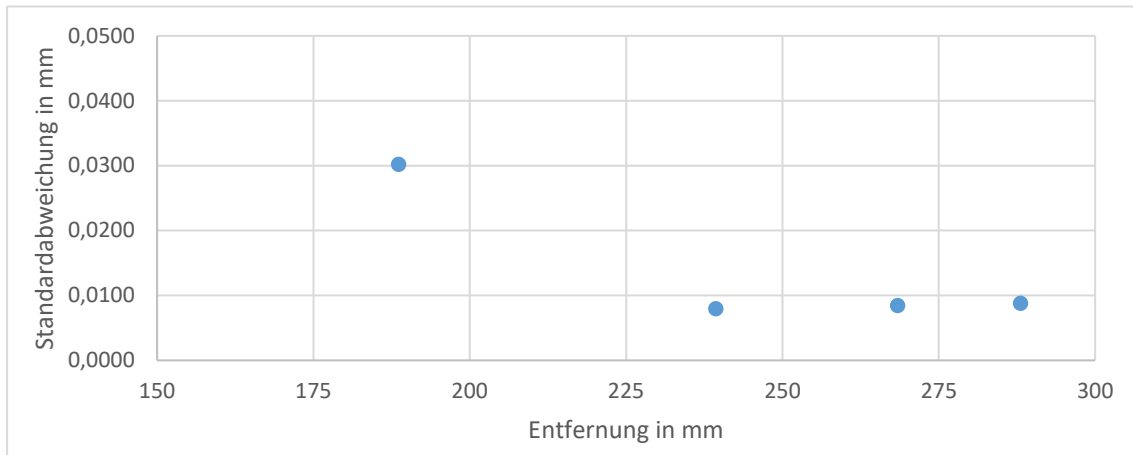


Abbildung 44: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 280$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung

Bei einer senkrechten Einstrahlung für diese Brennweite nimmt die Standardabweichung erst ab, dann zu. Offensichtlich unterscheidet sich, welcher Einfluss auf die Standardabweichung überwiegt. Dazu gibt es zwei gegenläufige Effekte, die im Folgenden noch erklärt werden. Zudem war die Messung relativ fehleranfällig aufgrund von Maßnahmen, um bei zwischendurch auftretenden Störungen der Messung einen Messwert herzustellen.

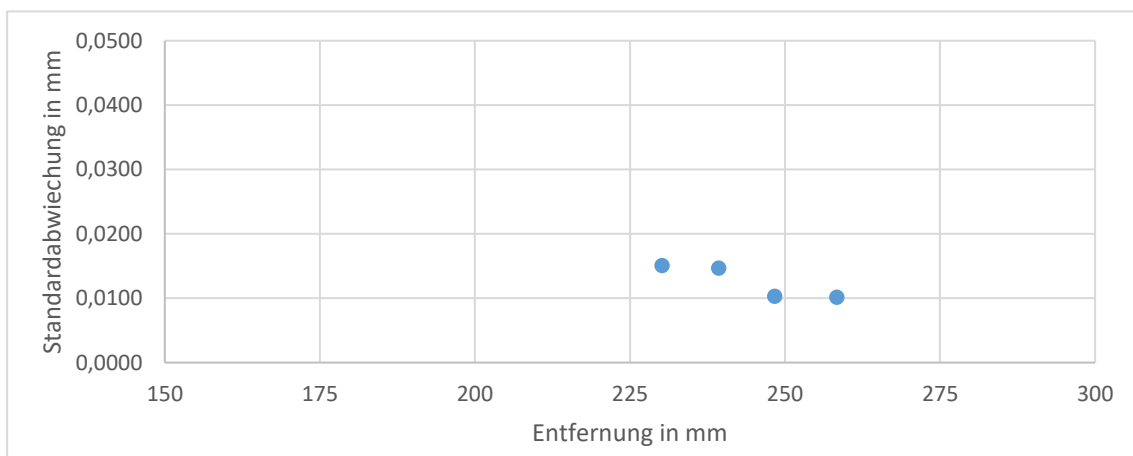


Abbildung 45: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung

Im Vergleich mit der Aufnahme der Standardabweichung an der Laseranlage für eine Brennweite von 280 mm an der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung zeigt sich bei dieser Messreihe eine Verringerung der Standardabweichung für Entfernungen über 230 mm. Auch hier verändert sich der stets negative Anstieg einer gedachten Trennlinie. Der Entfernungsbereich, in dem gemessen wurde, hat in Abb. 45 aus Gründen der Unterbrechung des Messbereiches ein kürzeres Intervall.

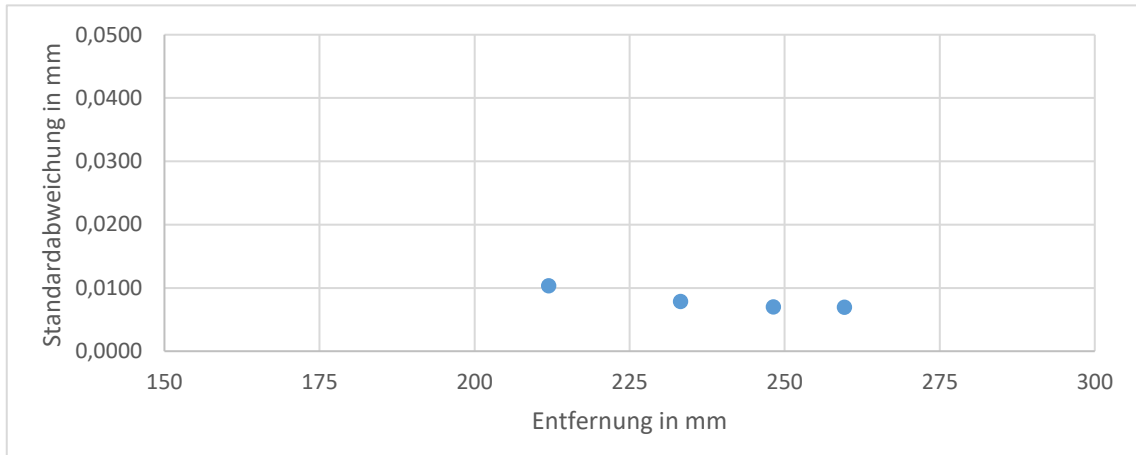


Abbildung 46: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 200$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung

Auch bei der Messreihe in Abb. 46 zeigt sich eine Verringerung der Standardabweichung mit zunehmender Entfernung. Der Anstieg einer gedachten Trendlinie verringert seinen Betrag, ist aber stets negativ. Das in den Abb. 47 und 48 gezeigte Verhalten wurde bei einer Brennweite von 150 mm beobachtet.

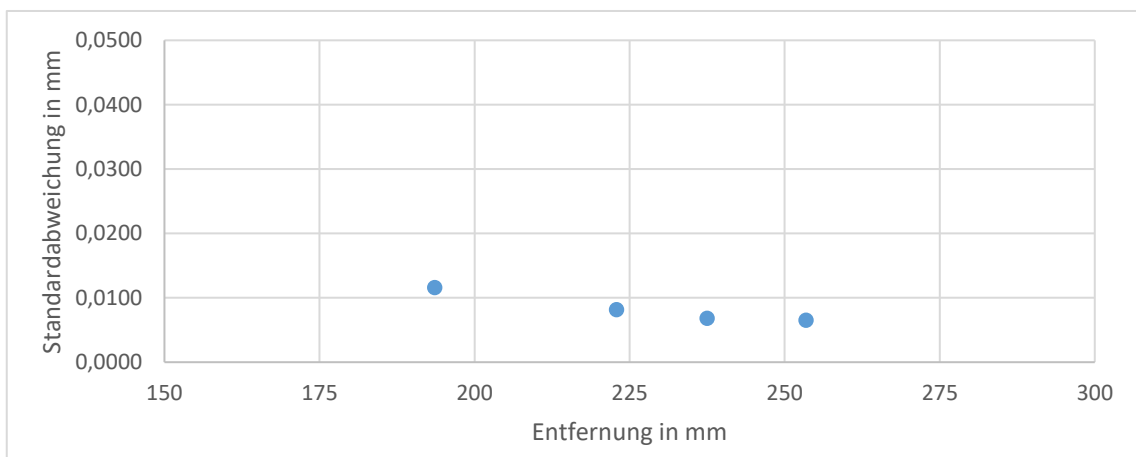


Abbildung 47: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für Seiteneinstrahlung

Die Messwertverteilung in Abb. 47 ähnelt jener in Abb. 46. Beide Messreihen repräsentieren also gleichermaßen den durch die exponentielle Kennlinie hervorgerufenen Effekt.

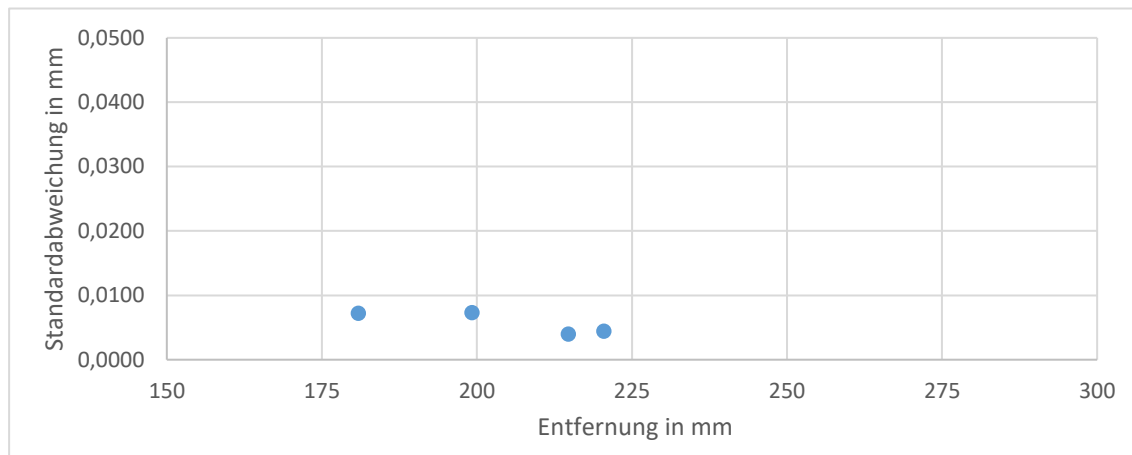


Abbildung 48: Messung der Standardabweichung an der Laseranlage LWS-C MIFULAS für $f = 150$ mm mit Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung

Auch bei der Messreihe in Abb. 48 wurde eine Abnahme der Standardabweichung in Abhängigkeit der Entfernung registriert. Der Verlauf einer gedachten Trendlinie entspricht nicht dem aus den Abb. 46 und 47. Da in Abb. 48 eine kürzere Weglänge auftritt als in den besagten Abbildungen, spricht das dafür, dass die degressive Abnahme der Standardabweichung in einem konkreten Entfernungsbereich am deutlichsten zu sehen ist.

Durch die Messung wurde gezeigt, dass mit der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung eine genügend hohe Wiederholgenauigkeit erzielt werden kann. Diese Vorrichtung erlaubt die weitere Nutzung des Beobachtungsarms. Das spricht dafür, für einen nachfolgenden Einsatz bei Weiterverwendung des LAS-T5 die Vorrichtung für Seiteneinstrahlung zu benutzen, allerdings die optimierte Variante. Die bisherigen Messungen hingegen sowie die noch in dieser Arbeit folgenden werden, wie bereits erwähnt wurde, ohne eine Fertigung der optimierten Variante getätigt. Die exponentielle Kennlinie beeinflusst diese Ergebnisse. Da sich die Spannung exponentiell aus den Entfernungen ergibt, hängen die Entfernungen logarithmisch von der Spannung ab. Welchen Einfluss daher die Messgenauigkeit der Spannung auf die Messgenauigkeit der Entfernung hat, wird unter „Fehlerrechnung“ und in den folgenden Absätzen näher betrachtet.

Bei beiden Vorrichtungen zeichnet sich der Trend ab, dass bei sinkenden Brennweiten auch die Abweichungen sinken. Das kann mit den sinkenden Entfernungen zusammenhängen, da die Messbereiche, die jeweils unter der Brennweite liegen, ausgenutzt wurden. Die Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung ermöglicht ebenfalls eine genügende Wiederholgenauigkeit. Jedoch verhindert diese Vorrichtung die weitere Nutzung des Beobachtungsarmes.

Bei allen Messreihen wurde ein allgemeiner Abfall der Standardabweichung in Abhängigkeit der Entfernung festgestellt. Das deutet darauf hin, dass bei diesen Brennweiten vor allem die Messgenauigkeit des Multimeters prägend ist, wie die Abb. 43 bis 48 zeigen. Auch bei einer Brennweite von 280 mm, bei der die sinkende Standardabweichung nicht eindeutig zu sehen ist, geht die Tendenz zum Teil in Richtung einer abnehmenden Standardabweichung. Insgesamt zeichnet sich ab, dass zwei gegenläufige Effekte den Verlauf der Standardabweichung beeinflussen. Dazu wurde bereits erklärt, warum die Abweichungen bei einer Entfernungsmessung progressiv steigen. Dies gilt jedoch nur, wenn nur die Abweichungen, die vom Entfernungsmesser selbst ausgehen, berücksichtigt werden. Die Entfernung steigt logarithmisch mit der gemessenen Spannung. Der Anstieg einer Logarithmusfunktion ist degressiv. Daher sinkt der Einfluss der Abweichungen am Multimeter mit steigenden Spannungen bzw. Entfernungen.

Zu erwarten ist, dass die durchschnittliche Standardabweichung an der Laseranlage geringer ist als am Demonstrator, da dabei keine mechanischen Erschütterungen auftreten können. Die durchschnittliche Standardabweichung beträgt am Demonstrator $8,84\text{ }\mu\text{m}$ und an der Laseranlage $12,17\text{ }\mu\text{m}$. Diese Hypothese wurde also nicht bestätigt. Allerdings waren die Oberflächen, auf die die Messlaserstrahlung appliziert wurde, unterschiedlich beschaffen. Das kann eine Erklärung für die erhöhte Standardabweichung an der Laseranlage sein. Außerdem wurde an der Laseranlage die Entfernung jedes Mal neu angefahren, da dies relativ wiederholgenau möglich ist. Jedoch besteht dennoch eine begrenzte Verfahrengenauigkeit. Ob nur die Stromversorgung dazwischen unterbrochen wird oder die Entfernung neu angefahren wird, beeinflusst auch die Wiederholgenauigkeit. Bei der Messung am Demonstrator wurde zwischen den Messungen innerhalb einer Messreihe nur die Stromzufuhr unterbrochen. Der scheinbare Widerspruch dazu, dass gemäß dem Datenblatt die Messwertabweichungen in Abhängigkeit von der Entfernung zunehmen, wird dadurch entkräftet, dass dabei von einer linearen Kennlinie ausgegangen wird.

Daher wird im Folgenden dargestellt, wie sich die Ergebnisse gemäß der linearen Kennlinie ergeben würden. Dazu wird die Standardabweichung der Spannung in den Abb. 49 und 50 dargestellt. Die Hypothese, dass bei einer Messung am Demonstrator Erschütterungen das Messergebnis beeinflussen können, wird dadurch bestätigt, dass sich an der Laseranlage das Verhalten der Standardabweichung zwischen verschiedenen Messreihen weniger unterscheidet.

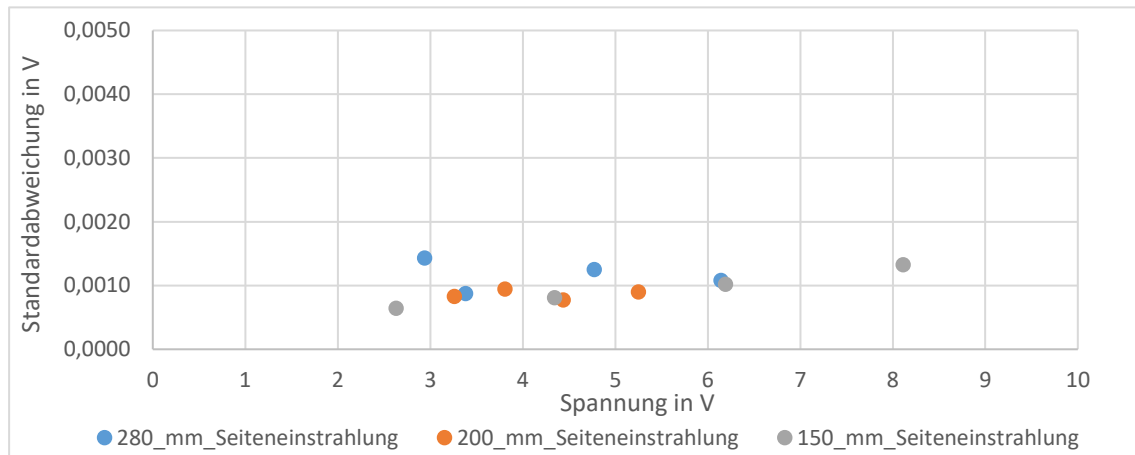


Abbildung 49: Standardabweichung der Spannung bei Seiteneinstrahlung an der Laseranlage

Zu erwarten ist, dass die Abweichungen in Abhängigkeit der Spannung zunehmen, was bei Brennweiten von 200 mm und 280 mm nicht zu beobachten ist. Allerdings waren diese Messungen schwierig durchzuführen und fehleranfällig. Zum Teil mussten bei der Seiteneinstrahlung für eine zum Erhalt von Messwerten notwendige Veränderung des Einstrahlwinkels die Fertigungstoleranzen ausgenutzt werden. Dies erhöht die Fehleranfälligkeit.

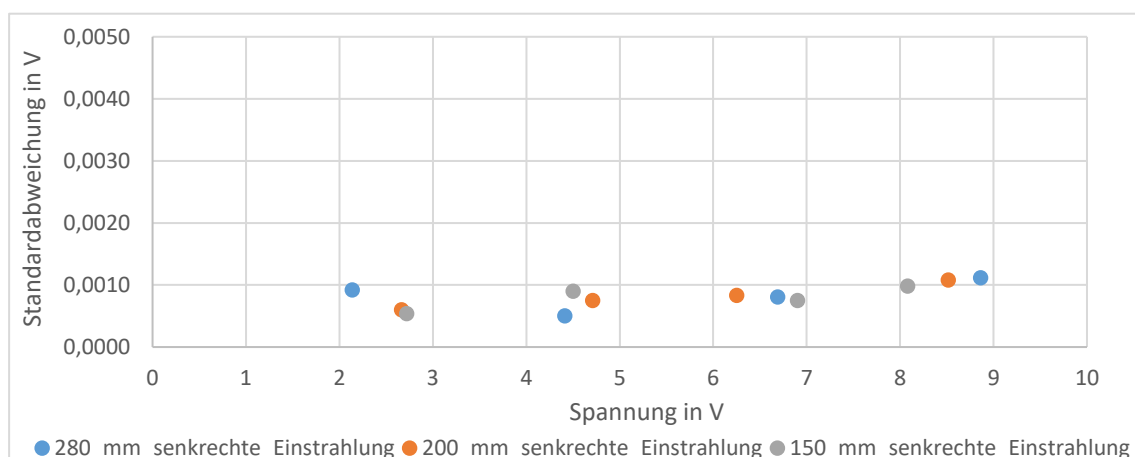


Abbildung 50: Standardabweichung der Spannung bei senkrechter Einstrahlung an der Laseranlage

Das Diagramm in Abb. 50 zeigt, dass die Standardabweichungen bei dieser Vorrichtung in Abhängigkeit der Messwerte und damit der gemessenen Spannungen meist linear oder mit alternierendem, aber durchschnittlich positivem Anstieg zunehmen. Dies entspricht den Erwartungen und bestätigt den Einfluss der Kennlinie auf den Verlauf der Standardabweichungen der Entfernungen.

Fehlerbetrachtung

Aufgrund der nichtlinearen Kennlinie kann der maximale Messfehler für die Entfernungen wesentlich geringer sein als der maximale Messfehler des Voltmeters. Eine Fehlerrechnung nach der Gleichung

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{1}{\ln \frac{U}{a}} \cdot \frac{\Delta U}{U} \quad (18)$$

wurde für eine gemessene Spannung von 5 V, eine Brennweite von 200 mm und die Nutzung der Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung am Demonstrator durchgeführt. Diese ergibt eine Genauigkeit von 0,091 %, wenn nur die durch das Multimeter UT61E zustande kommenden Abweichungen von 0,5 % berücksichtigt werden, die begrenzte Genauigkeit des Entfernungsmessgerätes LAS-T5 hingegen vernachlässigt wird. Diese Gleichung beruht auf der Näherung der Kennlinie zwischen der gemessenen Spannung und der Entfernung durch eine exponentielle Funktion nach dem Muster:

$$U = a \cdot e^{b \cdot z} \quad (19)$$

Unter Verwendung der Gleichung

$$\Delta z = \left| \frac{\partial z}{\partial U} \right| \cdot \Delta U \quad (20)$$

lässt sich Gleichung (18) herleiten. Dazu muss die Ableitung durchgeführt werden, nachdem Gleichung (19) nach z umgestellt wurde. Beide Seiten werden durch z dividiert. Anschließend wird dies auf einer Seite eingesetzt. Sowohl für das UT61D als auch für das LAS-T5 sind die maximalen Abweichungen angegeben. Die mittleren Abweichungen sind um ein Vielfaches geringer, wie in den Abb. 43 bis 48 ersichtlich ist.

5.2.4 Einfluss der Oberfläche

Das in Abb. 51 dargestellte Säulendiagramm zeigt, welchen Einfluss verschiedene Oberflächen auf die Schwankungen der Messergebnisse bei einer Verwendung des Demonstrators haben.

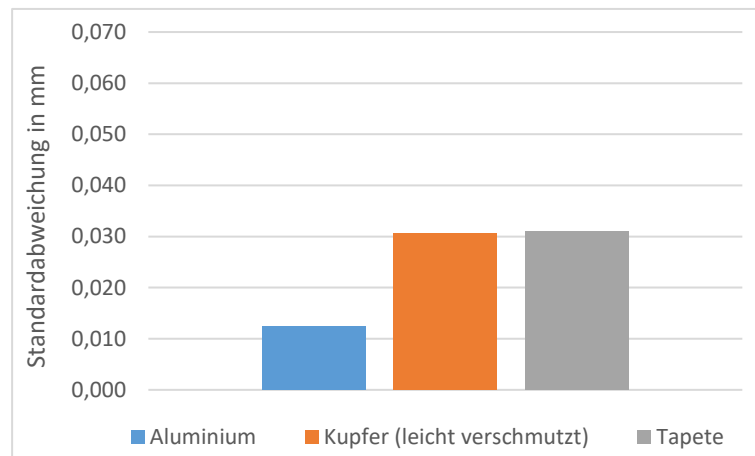


Abbildung 51: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche am Demonstrator

Zum einen wurde die Oberfläche eines Aluminiumprofils getestet. Diese ist vergleichsweise glatt und die Messung weist daher eine hohe Genauigkeit auf. Weiterhin wurde eine mit Kupfer beschichtete Platte verwendet. Diese ist durch Rußpartikel verschmutzt. Außerdem ist die Kupferbeschichtung zum Teil beschädigt. Somit ist bei dieser die Messgenauigkeit geringer. Zusätzlich dazu wurde zu einer Tapete hin gemessen. Auch diese weist eine höhere Rauheit und damit geringere Messgenauigkeit auf als Aluminium. Die aufgestellte These, dass eine größere Oberflächenrauheit zu einer geringeren Messgenauigkeit führt, wurde bestätigt.

Die Messreihen wurden für eine Brennweite von 280 mm mit der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung aufgenommen. Diese Bedingungen sind auch bei einer Messreihe unter 5.2.3 erfüllt. Jedoch sind beide Messreihen nicht direkt miteinander vergleichbar, da diese Messreihe mit einem anderen Multimeter namens Ironmeter aufgenommen wurde. Alle in Abb. 51 gezeigten Messreihen wurden beim gleichen Abstand gemessen, soweit das im Rahmen der Schwankungen eingestellt werden konnte. Dieser Abstand beträgt im Durchschnitt aller Messwerte 253,45 mm. Unter ähnlichen Bedingungen wurden mit dem UT61E die entsprechenden Messreihen an der Laseranlage LWS-C MIFULAS aufgenommen, wie Abb. 52 zeigt.

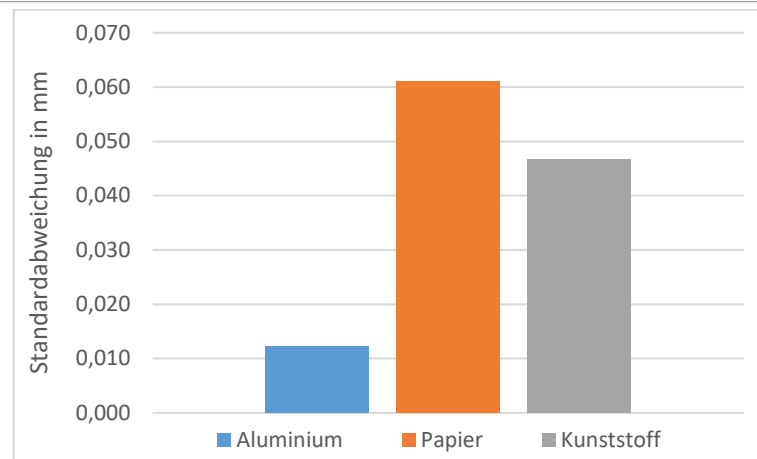


Abbildung 52: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche an der Laseranlage

Hier wurde ein durchschnittlicher Abstand von 281,94 mm gewählt. Die Unterschiede in den Bedingungen rufen keine wesentlichen Unterschiede in der Messgenauigkeit zwischen der Messung am Demonstrator und jener an der Laseranlage hervor, wie der Vergleich für die Standardabweichungen von Aluminium zeigt. Die anderen getesteten Oberflächen an der Laseranlage bestehen aus einem anderen Werkstoff als es am Demonstrator der Fall war. Somit können die anderen Standardabweichungen nicht zwischen Demonstrator und Laseranlage verglichen werden. Die verschiedenen Oberflächen können untereinander jedoch verglichen werden. Die Ergebnisse entsprechen dabei den Erwartungen. Dabei muss beachtet werden, dass der gleiche Werkstoff nicht bedeutet, dass gleiche Oberflächenbedingungen vorliegen, da sich die Rauheit dennoch unterscheiden kann. Die Beschaffenheit der Kunststoffoberfläche ist als Zwischenstufe zwischen der Beschaffenheit der Aluminium- und der Papieroberfläche einzuschätzen. Durch die Messung hat sich dies bestätigt. Beide Messvorgänge zeigen, dass der Einfluss der Oberfläche bei einer Aufnahme der Standardabweichung sichtbar ist. Dennoch können verschiedene Oberflächen unter Anwendung dieses Fokussuchesystems bearbeitet werden.

Jegliche Standardabweichungen liegen im Bereich unter 0,1 mm. Diese Abweichung wurde auch als das Ziel für die maximale Abweichung festgelegt. Ob dies auch erfüllt ist, konnte damit nicht bewiesen werden, jedoch ist dies ein Indiz dafür, dass die Messung auch unter Berücksichtigung der maximalen Abweichung präzise verläuft.

5.2.5 Winkelabhängigkeit

Zur Untersuchung der Winkelabhängigkeit der Messwerte und ihrer Genauigkeit wurde ein gekrümmter Gegenstand auf eine plane und zur optischen Achse senkrechte Platte gelegt. Um die verschiedenen Winkel zu erreichen, wurde von der Stelle an, an der eine zu der Platte parallele Tangentialebene an die in Abb. 53 rot eingefärbte Fläche angelegt werden kann, in Pfeilrichtung (x-Richtung) an der Laseranlage LWS-C MIFU-LAS verfahren.

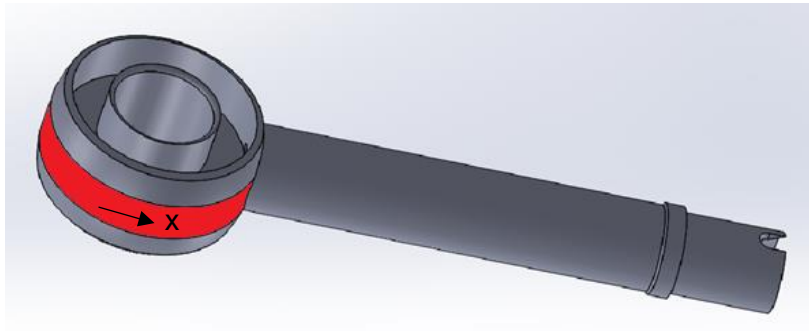


Abbildung 53: Werkstück zur Winkelmessung

Wenn der Verfahrweg und die Tiefe von besagter Stelle an gemessen werden, müsste theoretisch eine Kreiskurve resultieren. Der Durchmesser des in Abb. 53 rot eingefärbten Zylindermantels beträgt 40 mm. Gemäß Abb. 54 verläuft die tatsächliche Messpunktverteilung bei einer Messung mit dem UT61E.

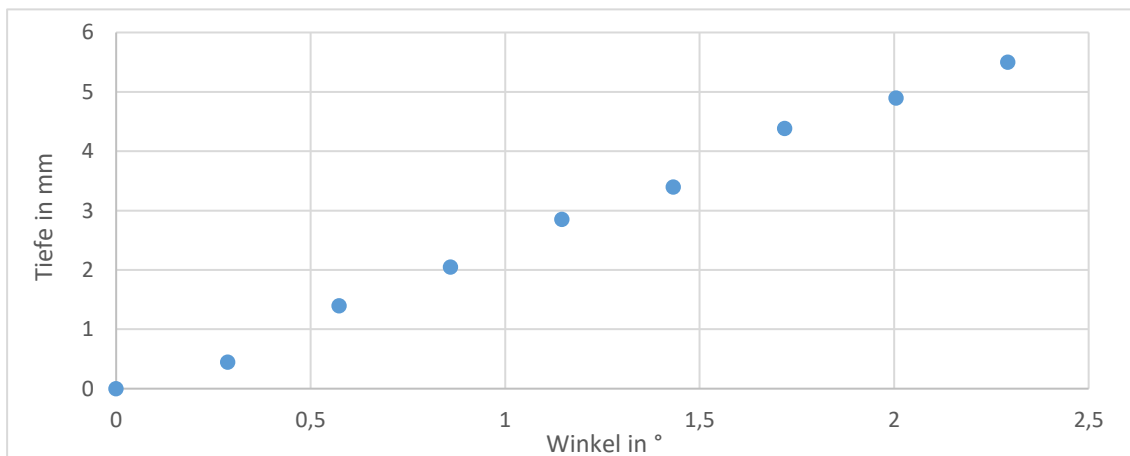


Abbildung 54: Tiefe in Abhängigkeit vom Winkel in Verfahrrichtung

Die näherungsweise Linearität ist mit kleinen Winkeln erklärbar. Allerdings können dabei theoretisch keine Tiefen auftreten, die wesentlich größer sind als der Fahrweg in x-Richtung. Dass dies dennoch der Fall ist, deutet auf eine Drift der gemessenen Spannung hin, aus der sich die gemessenen Entfernungen ergeben. Der Winkel, unter dem die Laserstrahlung auf das Werkstück auftrifft, beeinflusst den Weg ab der Rückreflexion. Dieser wird zudem durch die Fokussierlinse beeinflusst. Unter diesen Umständen ist eine solche Drift möglich. Das deutet darauf hin, dass sich für einen veränderten Winkel die Parameter der Kennlinie ändern. Um das LAS-T5 für raue Oberflächen oder für eine nicht senkrechte Einstrahlung einzusetzen, müsste für jeden Winkel eine neue Kennlinie aufgenommen werden. Dies wäre nur diskret möglich, würde aber auch dann über den Umfang dieser Arbeit hinausführen. Die unterschiedlichen Kennlinien für unterschiedliche Winkel sprechen für einen Wechsel des Messgerätes. Auch die Nichtmessbarkeit des Fokusabstandes spricht dafür. Dies wurde nach dem Testen der gemäß 5.1 verwendeten Vorrichtungen festgestellt. Daher wird die optimierte Variante im Rahmen dieser Arbeit unter Berücksichtigung des maximalen Selbstkostenpreises nicht gefertigt. Als Konzept für weitere Untersuchungen ist sie aber aufzunehmen. Auch die Standardabweichung in Abhängigkeit vom Winkel wurde ermittelt, wie in Abb. 55 zu sehen ist.

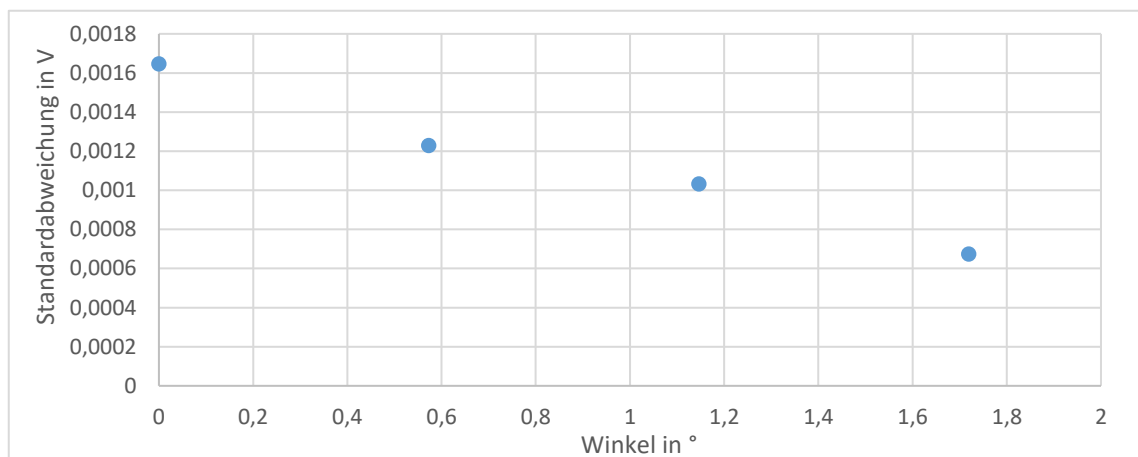


Abbildung 55: Standardabweichung in Abhängigkeit vom Winkel

Dabei ist zu beobachten, dass bei steigenden Winkeln die Standardabweichung sinkt. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Wiederholgenauigkeit steigt, da sowohl die Standardabweichung als auch die Wiederholgenauigkeit beschreiben, wie weit die Messwerte streuen. Die Gründe dafür können mit dem unterschiedlichen Weg durch den Bearbeitungskopf zusammenhängen. Ebenfalls ist es möglich, dass das Auswerteverfahren auf diffus reflektierte Strahlung mehr ausgelegt ist als auf gerichtet reflektierte Strahlung.

6 Änderung des Messgeräts

6.1 Variantenvergleich

Da gezeigt wurde, dass bei der Verwendung der Lasertriangulation die Brechung an der Fokussierlinse zu einer Verkürzung des Messbereiches führt, wird auf die Laufzeitmessung ausgewichen. Dabei verändert sich allerdings das Kosten-Nutzen-Verhältnis in eine unvorteilhafte Richtung. Die Messgenauigkeit erreicht bei der Laufzeitmessung selten die typischen Werte für die Lasertriangulation und in diesem Fall sind die Kosten meist hoch. Jedoch gibt es bei allen Verfahren Messgeräte mit einem unterschiedlichen Kosten-Nutzen-Verhältnis. Wenn das Messgerät andere Vorteile gegenüber jenem aus den Untersuchungen in [1] als die Genauigkeit liefert, kann ein geringeres Genauigkeitsziel verfolgt werden. Bei einer Genauigkeit, die ungefähr so hoch ist wie in [1], sind geeignete Messgeräte auf dem Markt vorhanden. In den Tab. 11 bis 14 werden die technischen Daten von vier Laufzeitmessgeräten dargestellt.

Tabelle 11: Technische Daten OY1P303P0102 [29]

Wellenlänge	660 nm
Messbereich	50 bis 3050 mm
Linearitätsabweichung	7 mm
Wiederholgenauigkeit	1 mm
Messrate	1 bis 500 Hz
Laserklasse	1
Abmessungen	20 mm x 50 mm x 50 mm

Tabelle 12: Technische Daten BOD 23K-LA01-S92 [30]

Wellenlänge	666 nm
Messbereich	100 bis 5000 mm
Auflösung	5 mm
Genauigkeit	0,6 %
Schaltfrequenz	250 Hz
Laserklasse	1
Abmessungen	23 mm x 52,4 mm x 51 mm

Tabelle 13: Technische Daten ODKL 96B [31]

Wellenlänge	658 nm
Messbereich	300 bis 25000 mm
Auflösung	3 mm
Genauigkeit	0,2 %
Wiederholgenauigkeit	10 mm
Laserklasse	2
Abmessungen	30 mm x 90 mm x 70 mm

Tabelle 14: Technische Daten ODSIL 96B [32]

Wellenlänge	785 nm
Messbereich	300 bis 10000 mm
Auflösung	3 mm
Genauigkeit	0,5 %
Wiederholgenauigkeit	5 mm
Laserklasse	1
Abmessungen	30 mm x 90 mm x 70 mm

Das OY1P303P0102 wurde von der Firma Wenglor sensoric GmbH produziert. Der Preis beträgt 507 €. Mit einem Preis von 299 € ist das BOD 23K-LA01-S92 der Firma Balluff GmbH kostengünstiger. Allerdings ist auch dessen Messgenauigkeit geringer. Das ODKL 96B wurde von der Firma Leuze electronic GmbH + Co. KG gefertigt. Mit Kosten von 342 € weist es das vorteilhafteste Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Das ODSIL 96B von der gleichen Firma hat mit Kosten von 415 € kein vorteilhafteres Kosten-Nutzen-Verhältnis. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wiederholgenauigkeit und die Auflösung für den Messbereich insgesamt angegeben sind. Die relative Angabe für die Messgenauigkeit bedeutet für eine Entfernung von 400 mm eine Messgenauigkeit von 0,8 mm und für jene von 500 mm eine Messgenauigkeit von 1 mm. Auch beim BOD 23K-LA01-S92 liefert die Messgenauigkeit für diesen Bereich eine geringere Abweichung als die Auflösung, die typischerweise höher ist als die Messgenauigkeit. Um das Kosten-Nutzen-Verhältnis anschaulicher darzustellen, wird Tab. 15 erstellt.

Tabelle 15: Kosten-Nutzen-Verhältnis Laufzeitmessgeräte

Messgerät	Kosten in €	Genauigkeit gesamt in %	Wiederholgenauigkeit in mm	Auflösung in mm	Linearität in mm
OY1P303 P0102	507	unbekannt	1	unbekannt	7
BOD 23K-LA01-S92	299	0,6	unbekannt	5	unbekannt
ODKL 96B	342	0,2	10	3	unbekannt
ODSIL 96B	415	0,5	5	3	unbekannt

6.2 Messgerät 1: ODKL 96B

Aufgrund des Kosten-Nutzen-Verhältnisses wird das ODKL 96B ausgewählt. Dieses weist die höchste Messgenauigkeit der vier Messgeräte auf. In Bezug auf die Kosten liegt es zwischen den anderen Messgeräten. Neben den Änderungen der Vorrichtungen ändern sich auch die Bedingungen für die Anzeige und die Kalibrierung. Das ODKL 96B hat ebenso wie das ODSIL 96B und das OY1P303P0102 einen eigenen Bildschirm. Somit ist keine Verwendung eines Multimeters notwendig.

Außerdem lässt es sich an einen PC anschließen. Die dafür benötigte Hardware, ein Parametrieradapter, wird von Leuze bereitgestellt. Der Eigenanteil der steuerungstechnischen Integration beläuft sich auf der Programmierung der Software und der Verknüpfung des PC mit der Steuerung. Dabei muss nicht die Software zur Anzeige der Messwerte neu programmiert werden, sondern jene zur Steuerung. Mit der Konfigurationssoftware und dem Parametrieradapter UPG 10 können die Messwerte auf einem Computer gespeichert und ausgewertet werden. Dies ist bedeutsam für eine Kalibrierung und Referenzierung des Messsystems und die damit einhergehende Steuerung. In Abb. 56 ist das Fenster für die Ausgabe und Bedienung der Konfigurationssoftware dargestellt. Die roten Punkte mit der interpolierten roten Linie kennzeichnen die Messwerte. Der aktuelle Messwert ist jeweils unter „Digitaler Messwert“ dargestellt.

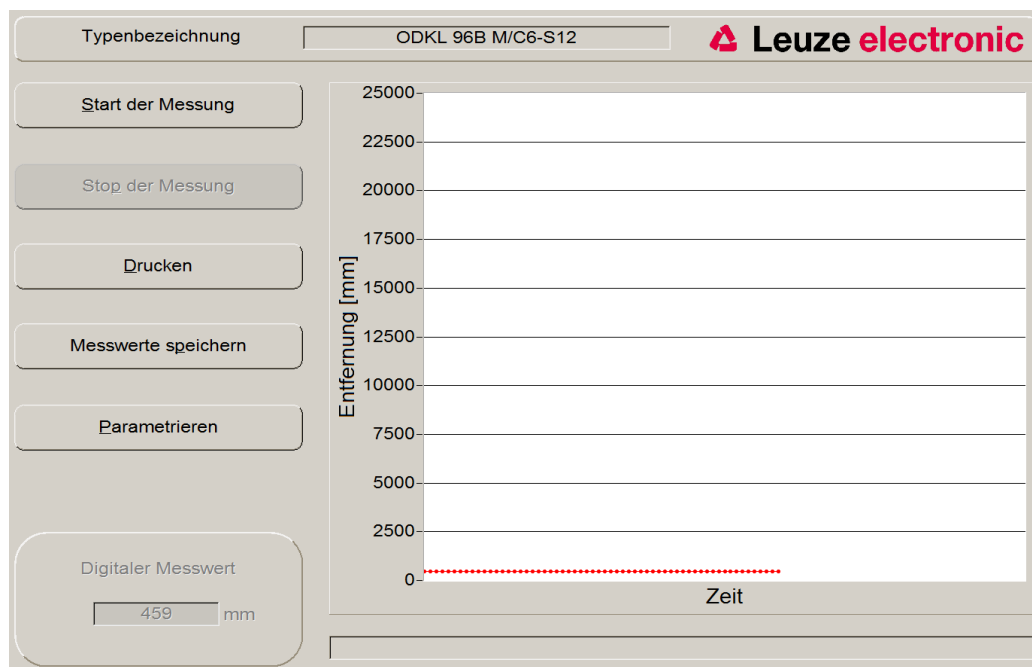


Abbildung 56: Ausgabefenster für Konfigurationssoftware des ODKL 96B

Eine erneute Überprüfung des Transmissionsverhaltens der Strahlung ist bei den verwendeten Wellenlängen der Laufzeitmessgeräte nicht notwendig. Die von den Laufzeitmessgeräten verwendeten Wellenlängen liegen zumeist, auch beim ODKL 96B, in dem Bereich, der auch von den Triangulationsmessgeräten abgedeckt wird. Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Laserstrahlung ist gering und muss daher ebenfalls nicht überprüft werden. Berücksichtigt werden muss allerdings das Reflexionsverhalten der vermessenen Oberfläche, da das ODKL 96B auf die Verwendung einer Reflexfolie ausgelegt ist. Wenn das Entfernungsmessgerät für eine automatische Fokusslagebestimmung eingesetzt wird, muss die Messung auch auf typischen Metalloberflächen funktionieren.

Das Ziel ist, dass die Messung parallel zur Bearbeitung abläuft. Wenn dies umgesetzt ist, würde eine Reflexfolie zerstört werden, wenn diese verwendet werden würde. Daher wird das ODKL 96B ohne die Verwendung einer Reflexfolie unter Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes getestet. Dabei ist die Beschaffung eines kostenlosen Testgerätes angemessen. Wenn sich zeigt, dass eine Vermessung typischer Metalloberflächen wiederholbar möglich ist, kann die kostenpflichtige endgültige Beschaffung realisiert werden.

Vor der Aufnahme von Messreihen konnte bereits beobachtet werden, dass es von verschiedenen Bedingungen abhängt, welche Fläche vom Messgerät als zu vermessende Fläche interpretiert wird. Das unter bestimmten Umständen erfüllte Ziel ist, dass dies die Werkstückoberfläche ist. Allerdings bestehen Unterschiede darin, von welcher Fläche aus der Messwert aufgenommen wird. Das Messgerät gibt bei mehreren Flächen die Entfernung zwischen zwei Flächen als Messwert an. Dabei konnte beobachtet werden, dass sowohl eine der Linsenflächen der Fokussierlinse als auch die Oberfläche des Teilerspiegels als Fläche, ab der die Entfernung beginnt, interpretiert werden können. Zu den Bedingungen, von denen solche Interpretationen abhängen, gehören die Entfernung und die Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks. Wenn sich während der Messung die Wahl der Flächen verändert, handelt es sich um ein Ausschlusskriterium.

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass die im Datenblatt angegebene Genauigkeit für die Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes ohne die Verwendung einer Reflexfolie nicht erfüllt ist. Bei Entfernungen von etwa 300 mm konnte eine Schwankung des Messergebnisses um mehrere Millimeter beobachtet werden. Gemäß den 0,2 % Messgenauigkeit, wie sie im Datenblatt aufgeführt sind, würde bei einer Entfernung von 300 mm die Messgenauigkeit 0,6 mm betragen. Dazu wurde untersucht, ob das Nichtvorhandensein einer Reflexfolie der Grund für diese Messungenauigkeiten ist.

Die Messlaserstrahlung wurde ohne Durchstrahlung des Bearbeitungskopfes auf ein Aluminiumprofil ausgerichtet. Dabei betrug der Messmittelwert 456,92 mm und die Standardabweichung 3,11 mm. Mit einer Standardabweichung von 0,68 % wurde somit gezeigt, dass die im Datenblatt angegebenen 0,2 % Messgenauigkeit nicht erfüllt sind. Dabei handelt es sich um eine Messung ohne erneute Ansteuerung und ohne Unterbrechung der Stromzufuhr. Das Ergebnis ist ein Indiz dafür, dass die verringerte Messgenauigkeit am Fehlen der Reflexfolie liegt.

Die maximale Abweichung ist stets höher als die Standardabweichung. Sie lässt sich durch die Wiederholgenauigkeit beschreiben. Diese ist im Datenblatt mit 10 mm angegeben. Wenn diese Angabe bereits bei Entfernungen zwischen 200 mm und 500 mm gilt, ist das eine weitere Erklärung für die Schwankungen der Messergebnisse. Das setzt voraus, dass die Bedingungen für die Angabe der Gesamtmessgenauigkeit nicht erfüllt sind. Dabei ist der Zeitunterschied zwischen der Transmission durch Glas und durch Luft unberücksichtigt. Das Messgerät ist auf eine Laufzeitmessung durch Luft ausgelegt. Der Brechungsindex in Glas ist jedoch höher. Somit ist die Mediumlichtgeschwindigkeit geringer. Für die Fokussierlinsen im Bearbeitungskopf beträgt der Brechungsindex 1,45004. Für die Mittendicken der Fokussierlinsen wurde der optische Wegunterschied berechnet, wie Tab. 16 zeigt.

Tabelle 16: Unterschied des optischen Weges durch Transmission durch Glas

Brennweite in mm	Mittendicke in mm	Differenz des optischen Weges in mm
280	4,4	1,98
200	7	3,15
150	8	3,60

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei einem außermittigen Auftreffen der Messlaserstrahlung der Unterschied des optischen Weges zu- oder abnimmt. Wenn die Messlaserstrahlung nicht senkrecht auf die Linsenoberfläche auftrifft, werden der geometrische und der optische Weg durch Brechung beeinflusst. Außerdem kommt es dann zu einem Versatz der Messlaserstrahlung. Unter der Bedingung, dass die Messlaserstrahlung senkrecht auf die Linsenmitte auftrifft, gelten die in Tab. 16 genannten Ergebnisse. Diese zeigen, dass die Fokussierlinse einen Unterschied des optischen Weges von mehreren Millimetern hervorruft. Hinzu kommt der Unterschied, den das Schutzglas hervorruft.

Der Unterschied des optischen Weges entspricht bei der Laufzeitmessung dem Unterschied des Messergebnisses. Daher muss bei entsprechenden Varianten der Programmierung der Steuerung dieser Unterschied berücksichtigt werden. In diesem Fall muss die Dicke des Schutzglases vorher herausgefunden werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass der Fokusabstand einmalig mit der konventionellen Methode gesucht wird und mit dem Entfernungsmessgerät ausgemessen wird. Dies liefert das Messergebnis, was bei einem Werkstück im Fokusabstand mit dem optischen Wegunterschied entsteht und in die Steuerung einprogrammiert wird.

Der Abstand zwischen Ein- und Ausgang der Messlaserstrahlung passt sich automatisch an, indem die Strahlung an unterschiedlichen Stellen der Sendeeinheit emittiert wird und an unterschiedlichen Stellen auf den Detektor trifft. Dies erleichtert die Einkopplung der Messlaserstrahlung. Für eine Durchstrahlung des Beobachtungsarmes kann dieses Messgerät also bezüglich der geometrischen Bedingungen eingesetzt werden. Jedoch wird durch die Kombination der optischen Elemente im Bearbeitungskopf und im Beobachtungsarm die Messlaserstrahlung so stark aufgeweitet, dass daran eine Messung durch den Beobachtungsarm scheitert. Das ist an einer relativ großflächigen Aufhellung der Werkstückoberfläche zu erkennen. Trotz der Leistungsverluste ist diese sichtbar. Jedoch ist unbekannt, ob die Intensität für eine Erkennung auf dem Detektor genügt, wenn die Messlaserstrahlung weniger aufgeweitet wird. Bei einer korrekten Positionierung am Beobachtungsarm wurde ein Messwert auf dem Messgerät angezeigt. Dieser gibt jedoch nicht den Abstand der Werkstückoberfläche, sondern den Abstand eines der optischen Elemente an.

6.3 Messgerät 2: ODSIL 96B

6.3.1 Grundsätzliches Verhalten

Bezüglich der verringerten Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit besteht die Wahl zwischen den Möglichkeiten, das ODKL 96B dennoch einzusetzen oder auf das ODSIL 96B auszuweichen. Dieses beruht ebenfalls auf Laufzeitmessung, weist aber eine geringere Gesamtgenauigkeit auf. Die Wiederholgenauigkeit ist jedoch höher. Auch Bedienung und Anwendbarkeit sind ähnlich. Da auch für dieses kostenlose Testgeräte verfügbar sind, kann getestet werden, ob es Vorteile gegenüber dem ODKL 96B liefert, die eine Anwendung ermöglichen. Das Kosten-Messgenauigkeit-Verhältnis ist aufgrund des höheren Preises und der geringeren Messgenauigkeit unvorteilhafter als beim ODKL 96B. Allerdings ist zu erwarten, dass die wechselnde Interpretation bezüglich der Flächen, zwischen denen gemessen wird, beim ODSIL 96B nicht auftritt. Da das ODSIL 96B auch nicht auf die Messung auf Reflexfolie ausgelegt wurde, ist zu erwarten, dass die tatsächliche Messgenauigkeit ohne Verwendung einer Reflexfolie beim ODSIL 96B höher ist als beim ODKL 96B. Aufgrund der veränderten Wellenlänge wird das Transmissionsverhalten überprüft. Dies liefert die in Tab. 17 dargestellten Ergebnisse. Dabei hat sich gezeigt, dass die Intensitätsverluste für den untersuchten Bearbeitungskopf höher sind als bei den anderen Messgeräten.

Tabelle 17: berechnete Intensitätsverluste ODSIL 96B

Laseranlagen, an denen Bearbeitungsoptik zum betrachteten Zeitpunkt in Verwendung	Intensitätsverluste in %
LS 64 C, LWS-P1000	70,66
SYSLAS (später LWS-C MIFULAS)	98,39
LWS-C	98,48
LWS-DM4, -DM5	42,35
LS 108 CI	76,85

Bei Messungen durch den Bearbeitungskopf, der zum Beginn der Untersuchungen in der SYSLAS verbaut war, konnte festgestellt werden, dass 1,61 % der Ausgangsintensität genügen, um einen Messwert zu erhalten. Da allerdings bei einer Entfernung von etwa 200 mm ebenfalls Schwankungen um mehrere Millimeter auftreten, obwohl dies gemäß dem Datenblatt eine Messgenauigkeit von 1 mm ergibt, ist anzunehmen, dass durch die hohen Verluste die Messgenauigkeit beeinträchtigt wird. Eine Messung an Bearbeitungsköpfen mit geringeren Verlusten oder eine Messung auf ein Profil ohne eine Strahlführung durch den Bearbeitungskopf kann dies belegen oder widerlegen. Bei der Messung ohne Strahlführung durch den Bearbeitungskopf wurde festgestellt, dass auch in diesem Fall eine Schwankung um mehrere Millimeter auftritt. Um dies näher zu untersuchen, wurde eine erneute Messung auf ein Aluminiumprofil durchgeführt. Der Messmittelwert beträgt 457,14 mm und liegt somit nahe am Messmittelwert der anderen Messung, was erwünscht ist, um die Messreihen miteinander vergleichen zu können. Die Standardabweichung beträgt 1,32 mm. Ungeachtet der Beobachtungen bei einer Entfernung von etwa 200 mm, die außerhalb vom Bereich einer linearen Kennlinie liegt, ergibt dies bei diesem Messmittelwert eine prozentuale Standardabweichung von 0,29 %. Dies widerspricht nicht der Erfüllung der im Datenblatt angegebenen 0,5 % Messgenauigkeit.

Um festzustellen, ob auch die maximale Abweichung in diesem Bereich liegt, kann dies für jeden der bei dieser Messung 90 Messwerte überprüft werden. Dabei wurden vier Messwerte gefunden, bei denen jeweils eine Abweichung von 0,62 % festgestellt wurde. Alle anderen Messwerte hatten eine Abweichung unter 0,5 %. In einer Näherung ist also für diese Entfernung die Angabe im Datenblatt erfüllt. Gründe für die nicht exakte Erfüllung, die mit der mechanischen Befestigung zusammenhängen, können nicht ausgeschlossen werden. Insgesamt wurde festgestellt, dass die Wiederholgenauigkeit beim ODSIL 96B höher ist als beim ODKL 96B. Dies entspricht auch den Angaben im Datenblatt, wenn die Angaben für die Gesamtmessgenauigkeit nicht berücksichtigt werden.

Für die Messung durch den Bearbeitungskopf im Bereich des Fokusabstandes wurde ebenfalls am Demonstrator die Standardabweichung aufgenommen. Bei einem Messmittelwert von 305,27 mm betrug diese 1,79 mm bzw. 0,58 %. Dies ist ungenauer als die im Datenblatt angegebene Messgenauigkeit. Da die Messung durch den Bearbeitungskopf im Datenblatt nicht berücksichtigt wurde, ist dieses Ergebnis plausibel, allerdings unvorteilhaft für das Erreichen des Forschungszieles. Bei größeren Entfernungen ist bei beiden Messgeräten zu beobachten, dass die falsche Wahl, zwischen welchen Flächen gemessen werden soll, vom Messgerät getroffen wird. Die Messung durch den Bearbeitungskopf erfolgte am gleichen Bearbeitungskopf wie die bisherigen Messungen. Aufgrund der Vermutung, dass die Ursache beim ODKL 96B im Fehlen der Reflexfolie und beim ODSIL 96B in den hohen Intensitätsverlusten liegt, kann beim ODSIL 96B leichter eine Lösung gefunden werden. Dazu kann überprüft werden, ob diese Fehlinterpretation auch bei anderen Bearbeitungsköpfen auftritt. Allerdings tritt diese Fehlinterpretation erst bei einer Entfernung auf, die mehrere Zentimeter über dem Fokusabstand liegt. Somit sollte vorerst überprüft werden, ob dieser Effekt der Einstellung des Fokusabstandes schadet. Das hängt davon ab, welcher Messbereich aufgrund von Unebenheiten und Krümmungen notwendig ist. Da davon auszugehen ist, dass diese Unterschiede hervorrufen, die höchstens im mm-Bereich liegen, ist dies kein Ausschlusskriterium. Der Einfluss von Winkeln und der Oberflächenbeschaffenheit auf das Messergebnis und auf die Messgenauigkeit wird gesondert untersucht.

Bei einer Durchstrahlung des Beobachtungsarmes trat die Aufweitung der Strahlung in einem geringeren Ausmaß auf als beim ODKL 96B. Jedoch konnte auch beim ODSIL 96B kein Messwert durch den Beobachtungsarm aufgenommen werden. Beim Versuch, dies zu erreichen, trat ebenfalls eine Fehlinterpretation auf. Dabei müssen die hohen Intensitätsverluste in Bezug auf den Transmissionsgrad der optischen Elemente berücksichtigt werden. Neben dieser Intensitäts- und Leistungsverringerung verringert auch die Aufweitung die Intensität, da sich dann die übrige Laserleistung auf eine größere Fläche verteilt. Bei Beobachtungsarmen von anderen Bearbeitungsköpfen ist zu erwarten, dass diese Aufweitung auch auftritt. Jedoch steht dabei durch geringere Leistungs- und Intensitätsverluste an den optischen Komponenten mehr Leistung zur Verfügung, die sich über diese Fläche verteilt. Bei ODKL 96B und ODSIL 96B ist die Führung der Messlaserstrahlung coaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung möglich.

Bei beiden Entfernungsmessgeräten kann nur die Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung mit veränderten Maßen verwendet werden. Eine Neufertigung einer Vorrichtung wird aus Gründen des Umfangs dieser Arbeit und aus Kostengründen nicht realisiert. Eines der Teile für diese Vorrichtung wurde mit veränderten Maßen während der Recherche nach Triangulationsmessgeräten aus firmeninternen Gründen erneut gefertigt. Dadurch entstehen keine erhöhten Kosten aufgrund der Verwendung dieses Bauteils.

6.3.2 Überprüfung der Messgenauigkeit

Für eine Brennweite von 280 mm wurde bei einer Messung an der LWS-C MIFULAS die Standardabweichung aufgenommen. Dies führte zu dem in Abb. 57 gezeigten Ergebnis. Der Fokusabstand ist im Diagramm rot markiert.

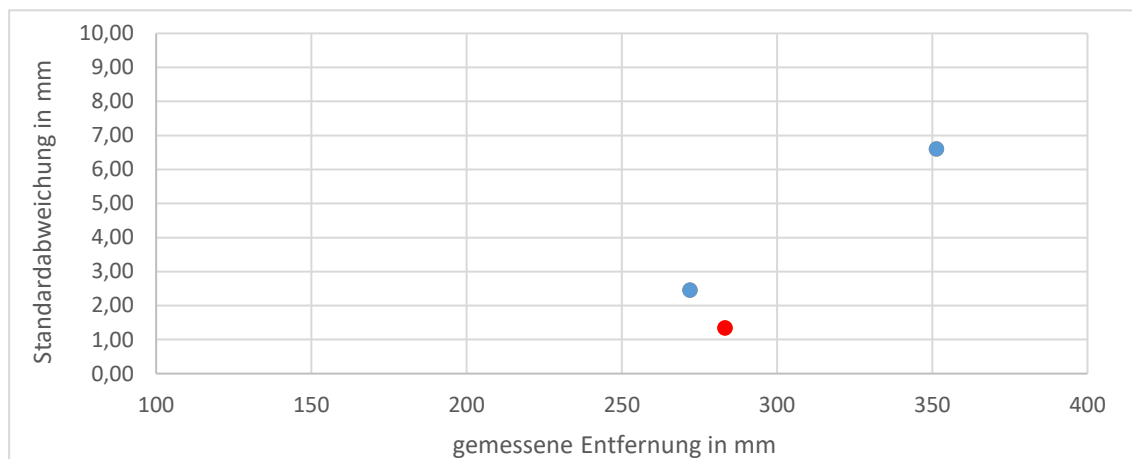


Abbildung 57: Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot)

Am Bearbeitungskopf ist an einer Kante gekennzeichnet, wie weit der Fokus von dieser Referenz entfernt ist. Durch eine Messung mit einem Stahlmaßstab wurde die Laseranlage auf diesen Abstand vom Werkstück eingestellt. Da der Messmittelwert nahe an 280 mm, der Brennweite der Fokussierlinse liegt, ist damit ein Indiz dafür vorhanden, dass die Entfernung zwischen der Fokussierlinse und der Werkstückoberfläche vom Messgerät ausgegeben wird. Allerdings ist zu untersuchen, ob die Abweichung des Messmittelwertes von der Brennweite an der Verlängerung des optischen Weges durch die Transmission durch Glas liegt. Anhand der Achseneinstellung kann ausgehend davon, dass die Entfernung beim Fokusabstand theoretisch 280 mm beträgt, für jede Messreihe die theoretische Entfernung ermittelt werden. Wenn in Abhängigkeit davon die Abweichung des Messwertes dargestellt wird, resultiert das in Abb. 58 dargestellte Diagramm.

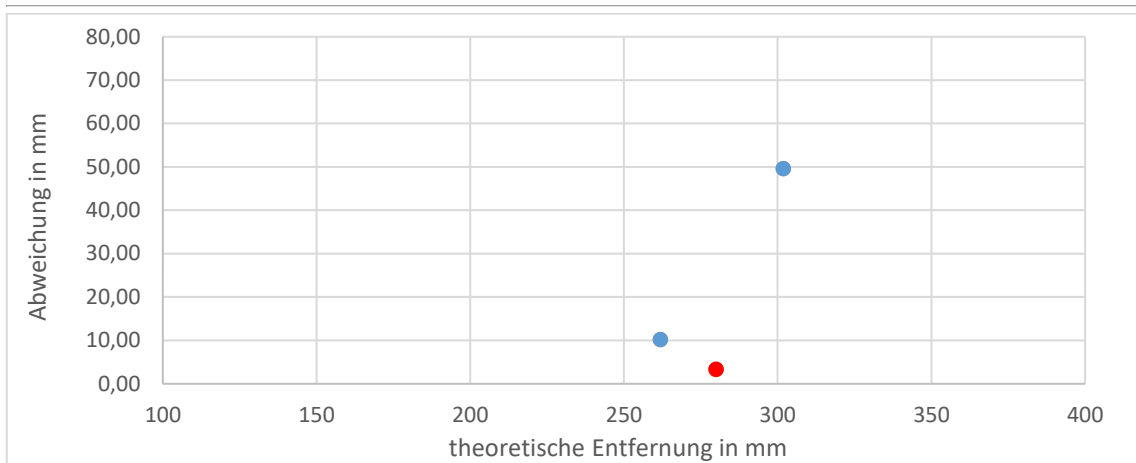


Abbildung 58: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot)

Dieses Diagramm zeigt, dass diese Abweichung ebenso wie die Standardabweichung beim Fokusabstand geringer ist als bei den anderen beiden Messreihen. Sowohl bei der Standardabweichung als auch bei der theoretischen Abweichung ist zu beobachten, dass für die Messreihe mit der höchsten Entfernung Abweichungen resultieren, die mit den bisherigen Ansätzen nicht erklärbar sind. Allerdings kann nach einer Korrelation zwischen der Standardabweichung und der Abweichung von der theoretischen Entfernung gesucht werden. Dafür wird in Abb. 59 ein Diagramm dargestellt, was diese beiden Größen als Achsen hat.

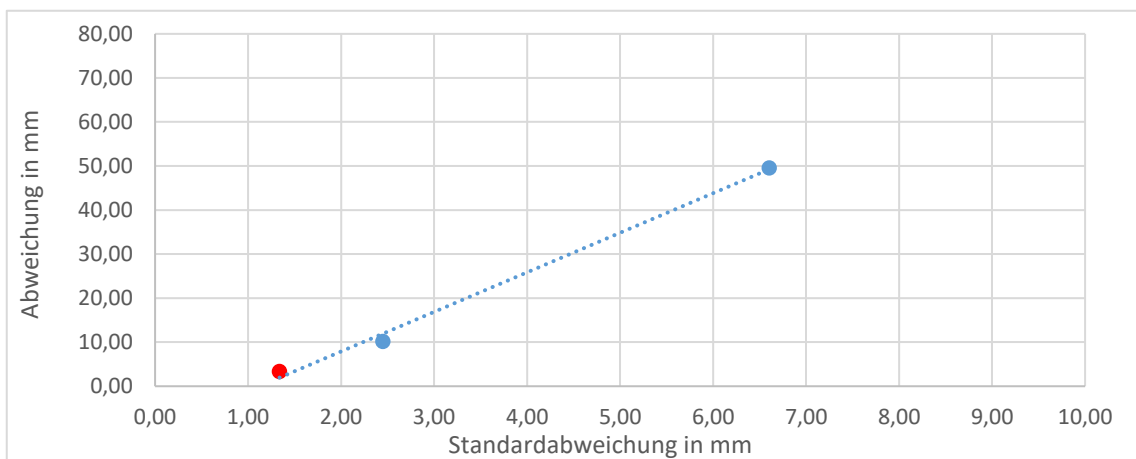


Abbildung 59: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung in Abhängigkeit von der Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 280 mm mit Fokusabstand (rot)

Diese Korrelation mutet linear an. Deshalb wurde auch eine lineare Trendlinie in das Diagramm gelegt. Ob diese Korrelation tatsächlich linear ist und ob diese Korrelation tatsächlich existiert und sich nicht zufällig ergeben hat, kann bei weiteren Untersuchungen durch den Vergleich einer größeren Anzahl an Messreihen geprüft werden.

Eine Verkürzung des Messbereiches aufgrund der Brechung bei der Laufzeitmessung tritt nicht auf. Jedoch kann durch die Brechung das Messergebnis beeinflusst werden. Die Rückreflexion verläuft nicht senkrecht zur Linsenoberfläche und trifft nicht auf den Linsenmittelpunkt auf. Dass die Messwertabweichungen beim Fokusabstand am geringsten sind, kann damit zusammenhängen, dass die Messlaserstrahlung in diesem Fall auf der Werkstückoberfläche maximal fokussiert ist. Es können somit kleinste Bereiche vermessen werden. Die Änderung des Reflexionswinkels durch Unebenheiten innerhalb des Strahlprofils ist geringer. Dadurch ist es denkbar, dass durch weitere Fokussierungen die Abweichung verringert werden kann, was Gegenstand nachfolgender Untersuchungen sein kann. Die Methode, um die Standardabweichung aufzunehmen, unterscheidet sich zwischen dieser Messung und denen unter 6.3.1. Während hier die Messwerte manuell abgelesen wurden, wurde unter 6.3.1 der Parametrieradapter verwendet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit ist auch in diesem Fall eine zusätzliche Messung mittels Parametrieradapter zweckmäßig. Diese ist objektiver, da bei ständig wechselnden Messwerten eine unbewusste Entscheidung erfolgt. Bei dieser Messung wurde die Entfernung stets neu angesteuert.

Für eine Brennweite von 200 mm wurden diese Messreihen ebenfalls aufgenommen. Eine Verkürzung der Brennweite ist bei diesem Messgerät nicht notwendig. Allerdings kann sich das möglicherweise veränderte Verhalten von Messgenauigkeit und Wiederholbarkeit im Produktionsbetrieb auf die Qualität auswirken. In Abb. 60 wird die sich aus diesen Messreihen ergebende Standardabweichung in der gleichen Weise wie bei einer Brennweite von 280 mm dargestellt.

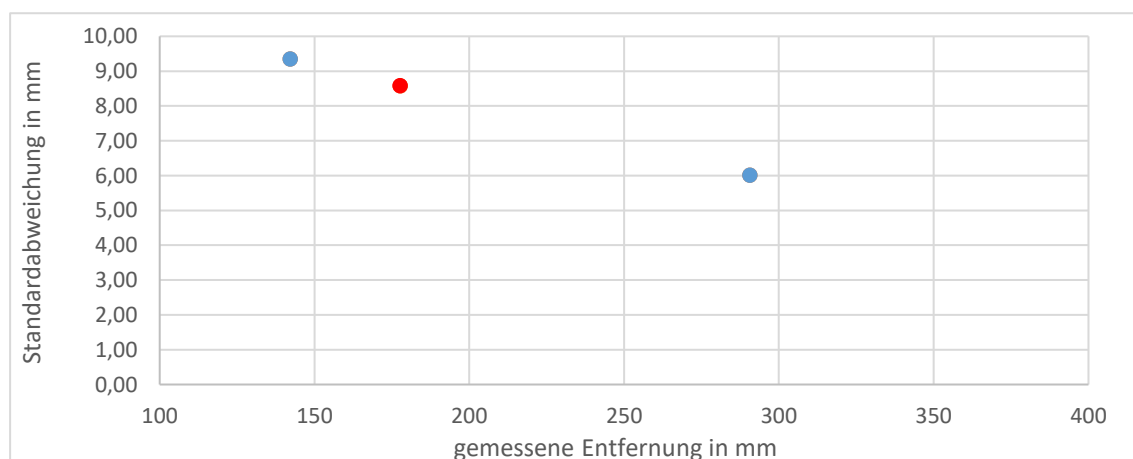


Abbildung 60: Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)

Im Gegensatz zu einer Messung bei einer Brennweite von 280 mm ist bei dieser Messung die Standardabweichung höher, aber monoton fallend. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Kennlinie des Messgerätes erst ab einer Entfernung von 300 mm linear ist. Diese Erklärung ist nach den bisherigen Erkenntnissen plausibler als jene bezüglich der Fokussierung der Messlaserstrahlung. Wäre die Fokussierung der Messlaserstrahlung der Haupteinflussfaktor, würde dies auch hier beobachtet werden. In Abb. 61 wird die Abweichung der gemessenen von der theoretischen Entfernung dargestellt.

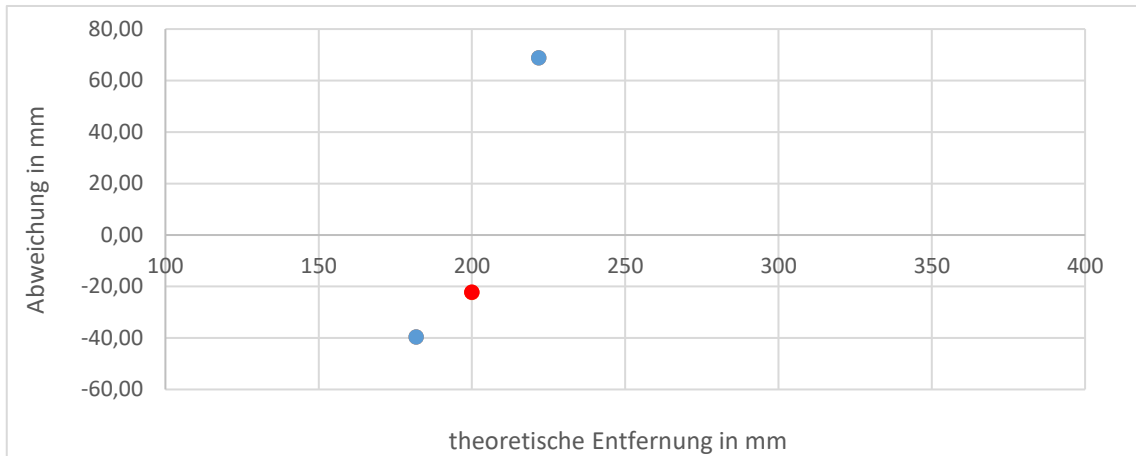


Abbildung 61: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)

Wenn die Abweichung nicht betragsmäßig betrachtet wird, ist diese monoton steigend. Die nichtlineare Kennlinie bei Entfernungen unter 300 mm kann dieses Verhalten beeinflussen. Sie wird aber bezüglich ihrer Auswirkung in Kombination mit Effekten der Brechung betrachtet. Auch die Gegenüberstellung der beiden Abweichungsarten erfolgt in Abb. 62 erneut.

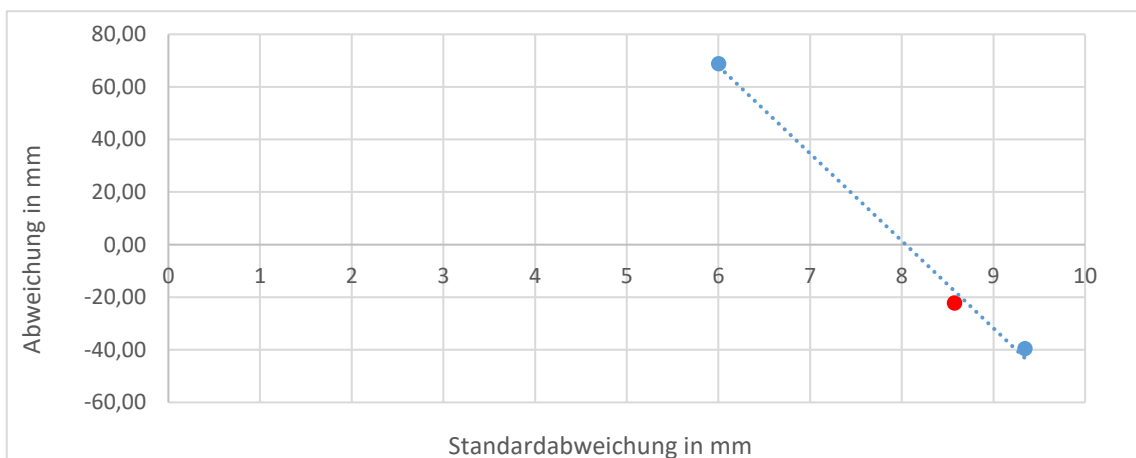


Abbildung 62: Abweichung des Messwertes von der theoretischen Entfernung in Abhängigkeit von der Standardabweichung bei Messung mit ODSIL 96B an der Laseranlage LWS-C MIFULAS bei einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)

Bei einer Brennweite von 280 mm ergibt sich erneut eine nahezu lineare Kennlinie zwischen der Standardabweichung und der Abweichung der gemessenen von der theoretischen Entfernung. In beiden Fällen befindet sich bei der Messreihe mit der mittleren Standardabweichung der Datenpunkt unter der Trendlinie. Die exakte Kurve kann also einen exponentiellen Charakter haben. Die Vorzeichen der jeweiligen Anstiege sind verschieden.

6.3.3 Einfluss der Oberfläche

Nachdem die Machbarkeit und die Genauigkeit untersucht wurden, wird der Einfluss der Oberfläche betrachtet. Die zu bewältigenden Herausforderungen bezüglich der Kennlinie und der Transmission und Brechung an den optischen Elementen bleiben bei einem Wechsel der Oberfläche die Gleichen. Somit ist zu erwarten, dass der Einfluss der Oberfläche gering verglichen damit ist. Jedoch steht dies in Verbindung mit dem Einfluss des Winkels. An Unebenheiten ändert sich der Winkel, unter dem die Messlaserstrahlung auf die Werkstückoberfläche auftrifft. Diese Vermutungen wurden überprüft, wie die Abb. 63 und 64 zeigen.

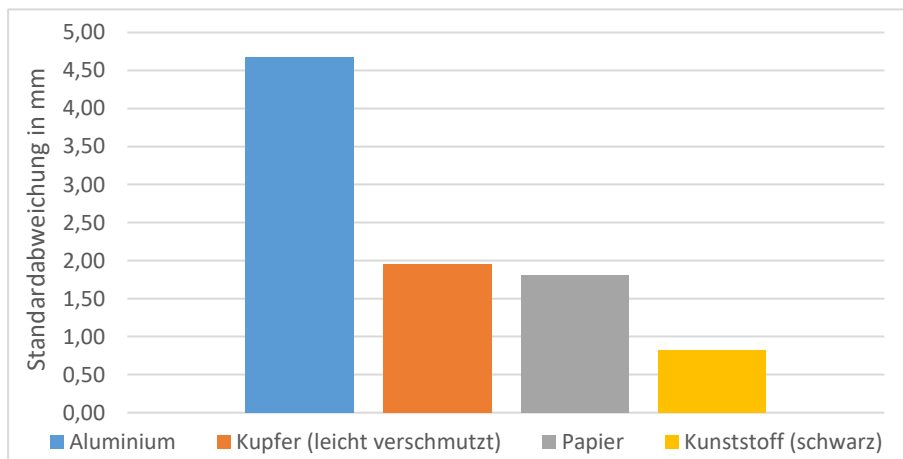


Abbildung 63: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche bei ODSIL 96B

Das Ergebnis in Abb. 63 verhält sich anders als das, was bei der Messung mit dem LAS-T5 entstand. In diesem Fall scheint nicht die Rauheit der Oberfläche der Haupteinflussfaktor zu sein, sondern die Reflektivität. Da einer der Messwerte in der Messreihe der schwarz gefärbten Kunststoffplatte ein Ausreißer zu sein scheint, wird in Abb. 64 zusätzlich das Ergebnis dargestellt, was sich ergibt, wenn der mutmaßliche Ausreißer nicht mit eingerechnet wird.

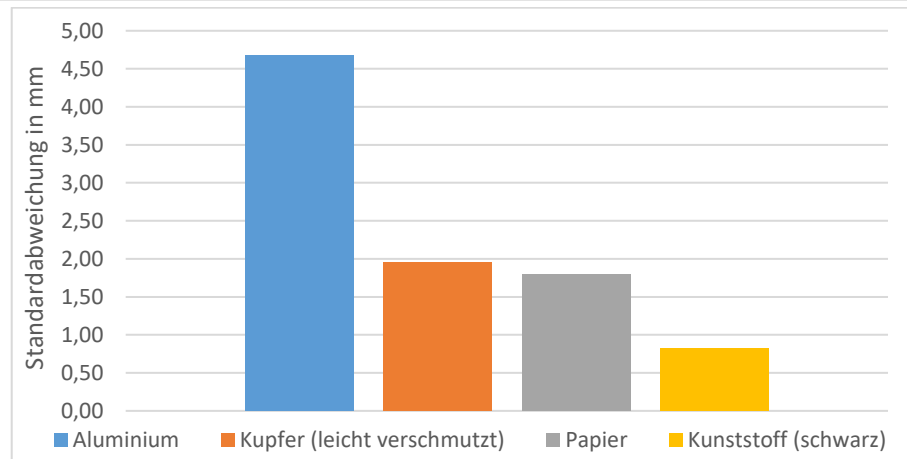


Abbildung 64: Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Oberfläche bei ODSIL 96B ohne Ausreißer

Unter diesen Umständen wird die Vermutung verstärkt, dass Oberflächen mit besonders hohen oder niedrigen Reflektivitäten bei diesem Messgerät die genauesten Messergebnisse liefern. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Kunststoffoberfläche glatter ist als die anderen Oberflächen.

6.3.4 Winkelabhängigkeit

Ebenso wie für das LAS-T5 die Winkelabhängigkeit untersucht wurde, wird dies auch für das ODSIL 96B getan. Dabei beeinflussen die bereits angesprochenen Aspekte das Ergebnis. Wie sich das im Konkreten auswirkt, wird in Abb. 65 anhand der Tiefe in Abhängigkeit vom Winkel entlang der Verfahrriichtung dargestellt.

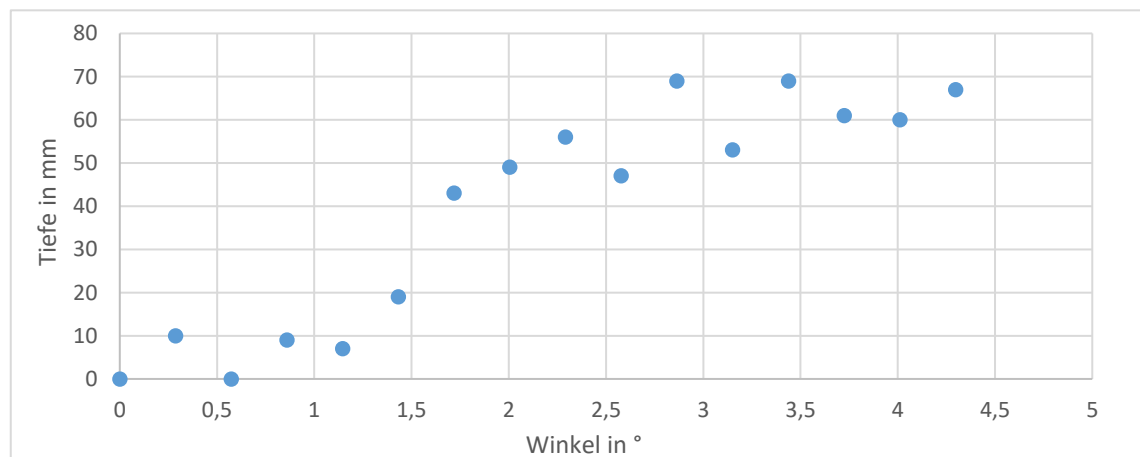


Abbildung 65: Tiefe in Abhängigkeit vom Winkel in Verfahrriichtung bei Messung mit ODSIL 96B

Der Effekt, dass die Tiefe stärker steigt als der Verfahrweg, trat bereits beim LAS-T5 in geringerem Ausmaß auf. In beiden Fällen entspricht dies nicht der Realität. Der Verlauf der Kurve ist erst progressiv, dann degressiv. In der Realität ist der Verlauf einer Kreiskurve in diesem Bereich jedoch komplett progressiv. In Abb. 66 wurde die Winkelabhängigkeit in Bezug auf die Standardabweichung untersucht.

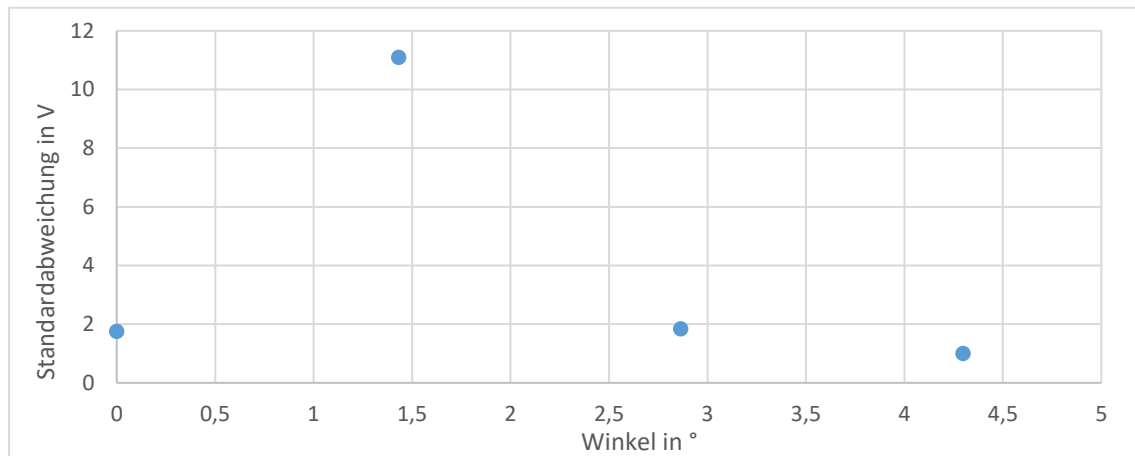


Abbildung 66: Standardabweichung in Abhängigkeit vom Winkel bei Messung mit ODSIL 96B

Die Standardabweichung nimmt in Abhängigkeit vom Winkel erst zu, dann ab. Dabei bildet sich ein Maximum aus, was deutlich über den anderen Messwerten liegt. Jedoch ist es auch möglich, dass es bei dieser Messreihe zu einer mechanischen Beeinflussung kam. Die Festigkeit des Aufbaus ist noch nicht optimal.

6.4 Messgerät 3: BOD 23K-LA01-S92

Da sich bisher keine ausreichende Wiederholbarkeit und Messgenauigkeit für das Ausmessen des Fokusabstandes ergeben hat, werden die anderen in Betracht gezogenen Messgeräte ebenfalls getestet. Auch beim Test des ODSIL 96B an einem anderen Bearbeitungskopf hat sich dies nicht geändert. Lediglich beim LAS-T5 würden die Ergebnisse in diesen Kriterien genügen. Jedoch wurde dieses Messgerät aufgrund der Verfälschung der Kennlinie ausgeschlossen. Für das Testen mehrerer Laufzeitmessgeräte müssen aufgrund der Verwendung von Testgeräten auch keine Mehrkosten aufgewendet werden. In den Selbstkostenpreis fließen ausschließlich die Kosten des endgültig gewählten Messgerätes aufgrund der Untersuchungen für Laufzeitmessgeräte mit ein. Die mechanische Vorrichtung, die für das Testen des LAS-T5 verwendet wurde, kann für diese Messgeräte ohne eine Veränderung der Maße verwendet werden, da sie geringere Abmessungen als ODKL 96B und ODSIL 96B haben.

Beim BOD 23K-LA01-S92 beträgt der Abstand zwischen Sender und Empfänger der Messlaserstrahlung 8,6 mm. Demnach wird die Durchstrahlung des Beobachtungsarmes zu diesem Zeitpunkt nicht ausgeschlossen. Dieses Messgerät verfügt nicht über eine eigene Anzeige. Ebenso wie beim LAS-T5 muss das Messsignal über ein Multimeter visualisiert werden. Dieses wird dann als Spannung oder als Stromstärke ausgegeben, was in eine Entfernung umgerechnet werden kann. Somit ist auch die Übertragbarkeit der Messergebnisse gegeben. Da einige Multimeter wie das UT61E die Messdaten an einen PC übertragen können, kann somit per Software die Messung, die mittels des BOD 23K-LA01-S92 ausgeführt wird, ausgewertet werden. Beim BOD 23K-LA01-S92 ist ohne eine Veränderung der Einstellungen keine Messung möglich. Jedoch konnte beobachtet werden, dass dies von der Oberflächenbeschaffenheit und/oder dem Einstrahlwinkel anhängen kann. Daher wurde dieses Entfernungsmessgerät mit anderen Oberflächen getestet. Dabei konnte ebenfalls nicht die Entfernung der Werkstückoberfläche gemessen werden. Ob dies bei einem veränderten Einstrahlwinkel auch der Fall ist, wurde nicht getestet, da die Funktionstüchtigkeit bei senkrechter Einstrahlung gegeben sein muss.

Durch das Teachen kann der Messbereich festgelegt werden. Dabei handelt es sich um eine Einstellung des Messbereichs, durch die der Messbereich verkleinert wird. Die Messung wird dadurch genauer. Teiltransparente Objekte außerhalb dieses Messbereiches werden dann nicht vermessen. Auf diese Art ist es möglich, die Entfernung der Werkstückoberfläche zu vermessen. Dazu muss vermeiden werden, dass sich teiltransparente Flächen innerhalb des Messbereiches befinden. Außerdem entstehen dann bei jeder unterschiedlichen Oberfläche unterschiedliche Messwerte. Bei der Oberfläche, auf der das Messgerät geteacht wurde, wurde ein Bereich von 2 cm unter dem Fokusabstand bis 2 cm über dem Fokusabstand gewählt. Nach dem Teachen traten beim Fokusabstand Schwankungen auf, bei denen meist die Spannung in einem Intervall von 2 V lag. Dies entspricht einem Intervall von 8 mm und erfüllt somit unter diesen Bedingungen auch nicht die im Datenblatt angegebene Genauigkeit von 0,6 %. Auch die Notwendigkeit der Verwendung eines Multimeters, die dadurch besteht, dass keine Anzeige vorhanden ist, ist ein Nachteil. Weiterführende Messreihen werden daher nicht aufgenommen. Sollte bei nachfolgenden Untersuchungen das BOD 23K-LA01-S92 dennoch näher betrachtet werden, so ist insbesondere die Einstellbarkeit des Messbereiches zu betrachten, da diese vorteilhaft für die Messungen ist.

Eine Nullung des Messsystems wäre durch das Teachen möglich. Allerdings würde dann nur die Möglichkeit bestehen, sich aus einer Richtung dem Fokusabstand anzunähern. Die untere Grenze des Messbereiches wäre dann der Fokusabstand, was allerdings die gemessene Spannung auch nicht exakt auf 0 V bringen würde. Daher ändert diese Überlegung nicht die Wahl des Messgerätes. Bezüglich der Nullung wird bei weiterführenden Untersuchungen das Konzept über eine Software zur nachträglichen Nullung verfolgt.

6.5 Messgerät 4: OY1P303P0102

6.5.1 Bedingungen und Beobachtungen

Ein Analogausgang sowie eine IO-Schnittstelle sind beim OY1P303P0102 vorhanden. Die Übertragung der Messdaten an einen PC ist also möglich. Weiterhin ist das Messgerät klein und somit leicht integrierbar. Die Stabilität des Messgerätes verringert die Sicherheitsanforderungen bei der mechanischen Befestigung, was beim BOD 23K-LA01-S92 ebenfalls der Fall ist. Für die mechanische Befestigung ist das grundlegende Konzept der Optimierung der Vorrichtung für Seiteneinstrahlung geeignet. Die Maße müssen an dieses Messgerät angepasst werden. Aus Kostengründen wird dies allerdings für erste Untersuchungen nicht realisiert. Das OY1P303P0102 weist geringe Messwertschwankungen bei einer Durchstrahlung des Beobachtungsarmes auf. Allerdings wird nicht die Entfernung der Probenoberfläche, sondern die Entfernung des Schutzglases angezeigt. Die Einstellungen, die bei diesem Messgerät getätigt werden können, umfassen nicht die Signalstärke des Messsignals innerhalb derer ein Messwert ausgegeben wird. Das bedeutet, dass es nicht einstellbar ist, bei welcher Gesamtreflektivität die Werkstückoberfläche als zu vermessende Fläche interpretiert wird.

Jedoch können Bedingungen hergestellt werden, die eine Messbarkeit der Entfernung der Probenoberfläche ermöglichen. Dazu ist zum einen die Verwendung eines anderen Bearbeitungskopfes erforderlich. Für die nachfolgenden Messungen wird ein als 90°-Variante aufgebauter Bearbeitungskopf verwendet. Die Transmissionseigenschaften dieses Bearbeitungskopfes sind nicht bekannt und mussten in diesem Rahmen experimentell ermittelt werden. Dass dabei die Entfernung der Probenoberfläche gemessen wird, konnte am Monotonieverhalten bei einem veränderten Abstand der Werkstückoberfläche festgestellt werden. Bei einer alleinigen Einhaltung dieser Bedingung wird der Messwert verfälscht.

Um realistische Messwerte zu erhalten, muss die mechanische Integration verändert werden. Das Entfernungsmessgerät muss dazu einige Millimeter weiter vom Teiler-
spiegel entfernt fixiert werden. Ohne die Neukonstruktion einer Vorrichtung oder eines ihrer Bauteile ist dies jedoch nicht wiederholgenau möglich. Die Neukonstruktion einschließlich ihrer Fertigung ist im Rahmen des Umfangs dieser Arbeit jedoch nicht möglich. Daher wird ein zusätzliches Bauteil benutzt, was in Abb. 67 skizziert ist. Dieses wird in die Vorrichtung eingelegt, sodass der Abstand wiederholgenau verändert wird. Unter diesen Bedingungen wird die Standardabweichung der Messwerte von ihrem Mittelwert aufgenommen.

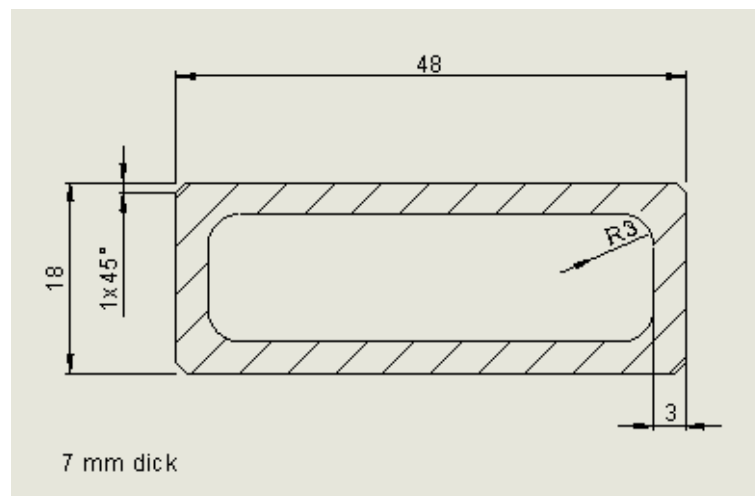


Abbildung 67: Form des Körpers zur Positionskorrektur

6.5.2 Kennlinienaufnahme für verschiedene Oberflächen

Vor der Aufnahme der Standardabweichung erfolgt eine Aufnahme der Kennlinie, da Indizien dafür gefunden wurden, dass die gemessene Entfernung nicht immer der tatsächlichen Entfernung entspricht. Dies wurde für verschiedene Materialien getätigt, wie die Abb. 68 bis 71 zeigen. Der Fokus ist in den Diagrammen rot markiert. Die Linearität zwischen der gemessenen und tatsächlichen Entfernung ist soweit gegeben, dass die Überprüfung der Abweichungen von dieser mittels Fehlerbalken angemessen ist.

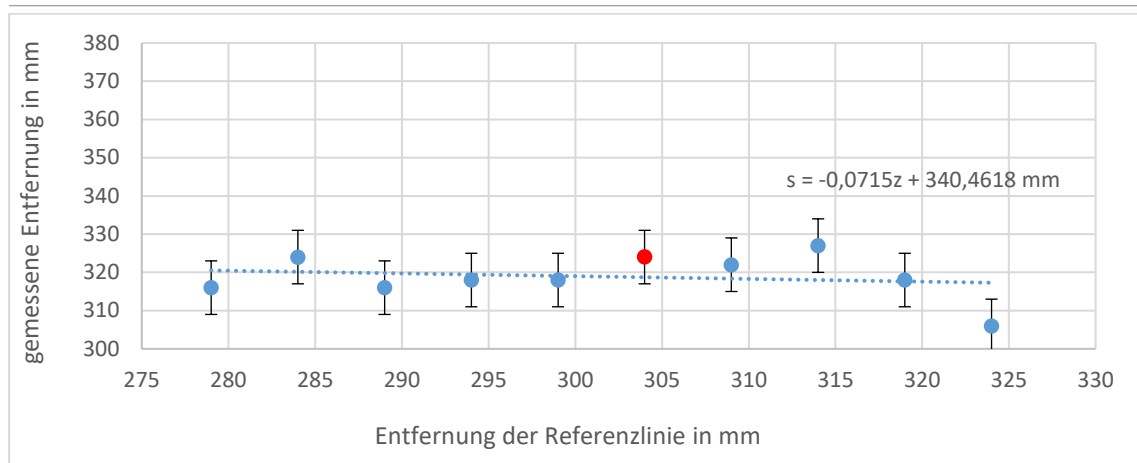


Abbildung 68: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Stahl mit Fokusabstand (rot)

Bei Stahl konnte keine eindeutige Korrelation und keine monotone Steigung des Graphen zwischen der Entfernung der Referenzlinie und der gemessenen Entfernung festgestellt werden. Für Stahl ist also die Messung unter diesen Bedingungen nicht geeignet. Größtenteil ist ein steigender Trend zu erkennen, wobei es bei größeren Entfernungen zu einem Abfall kommt, der auch insgesamt eine fallende Trendlinie bewirkt.

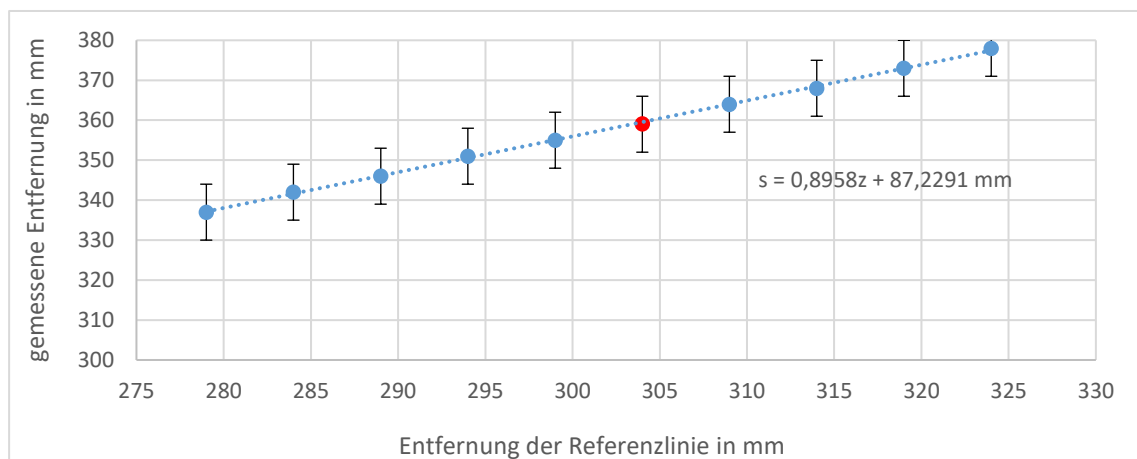


Abbildung 69: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit Fokusabstand (rot)

Bei Aluminium ist der Graph zwischen der Entfernung der Referenzlinie und der gemessenen Entfernung monoton steigend. Bei einer exakten Messung wäre der Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Achsen eins. Auch in diesem Fall wäre es möglich, dass es einen Summanden zwischen diesen beiden Achsen gibt, da das Messgerät nicht von der Referenzlinie aus misst.

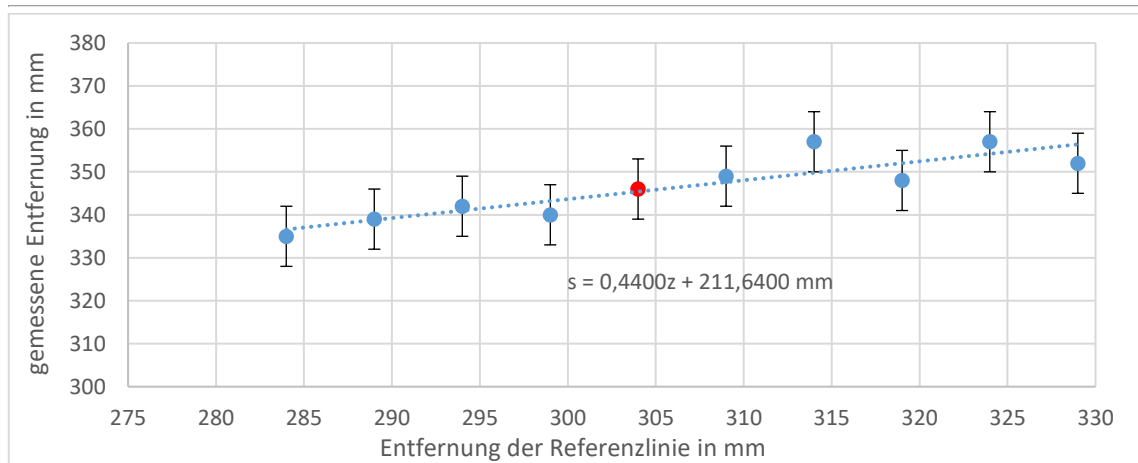


Abbildung 70: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Kunststoff (hell) mit Fokusabstand (rot)

Wenn es sich bei der vermessenen Oberfläche um eine helle Kunststoffoberfläche handelt, ist eine Korrelation zwischen der Entfernung der Referenzlinie und der gemessenen Entfernung sichtbar. Der Graph ist aber nicht komplett monoton steigend. Hierbei gibt es Abweichungen von der linearen Steigung. Diese sorgen teilweise dafür, dass die Messwerte mit steigenden tatsächlichen Entfernungen zwischendurch sinken, was um den Fokusabstand nicht der Fall ist. Dazu muss beachtet werden, dass auch im Datenblatt eine Linearitätsabweichung von 7 mm angegeben ist. Anhand der Fehlerbalken ist erkennbar, dass diese Angabe erfüllt wurde. Hinzu kommt die Brechung, welche den Proportionalitätsfaktor deutlich unter eins erklären könnte.

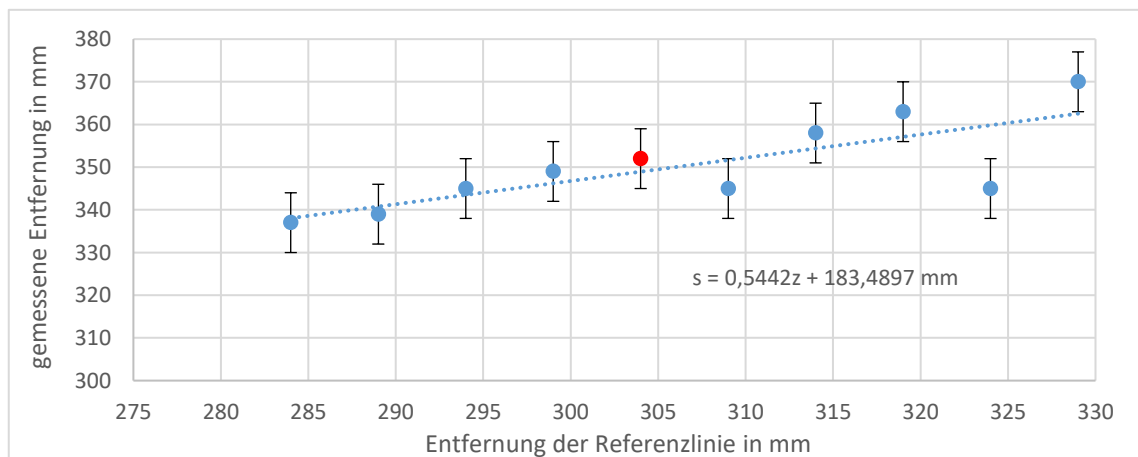


Abbildung 71: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Kupfer mit Fokusabstand (rot)

Für Kupfer zeichnet sich ein ähnliches Verhalten ab wie für eine helle Kunststoffoberfläche. Der Unterschied ist, dass die Abweichungen bei großen Entfernungen nicht mit der Linearitätsabweichung erklärbar sind. Der Fokusabstand liegt nicht im Bereich sinkender Messwerte. Dieser ist bei der hellen Kunststoffoberfläche in einem monoton steigenden Bereich und bei der Kupferoberfläche am Ende eines solchen Bereiches.

Insgesamt ist der Trend zu beobachten, dass bei stark reflektierenden Oberflächen die Korrelation zwischen der Entfernung der Referenzlinie und der gemessenen Entfernung eindeutiger zu erkennen ist als bei weniger stark reflektierenden Oberflächen. Das führt zu der Schlussfolgerung, dass bei hellen Oberflächen der Entfernungsmesser für eine Fokuslagebestimmung eingesetzt werden kann. Abweichungen von der Linearität sind dabei relativ unproblematisch, solange die Kennlinie im Bereich um den Fokusabstand monoton steigend ist. Die Linearitätsabweichung beträgt gemäß des Datenblatts 7 mm.

Um die Bedingungen, unter denen eine nahezu lineare Kennlinie entsteht, weiterhin zu ergründen, wurde für Aluminium für eine Brennweite von 200 mm die Kennlinie aufgenommen, wie Abb. 72 zeigt. Da die bisherigen Kennlinien alle bei der gleichen Brennweite aufgenommen wurden, ist bisher nicht bekannt, wie das Messsystem auf eine Änderung der Brennweite reagiert. Die bereits festgestellte Tatsache, dass die Messbarkeit des Fokusabstandes von verschiedenen Bedingungen abhängt, verstärkt die Notwendigkeit solcher Untersuchungen.

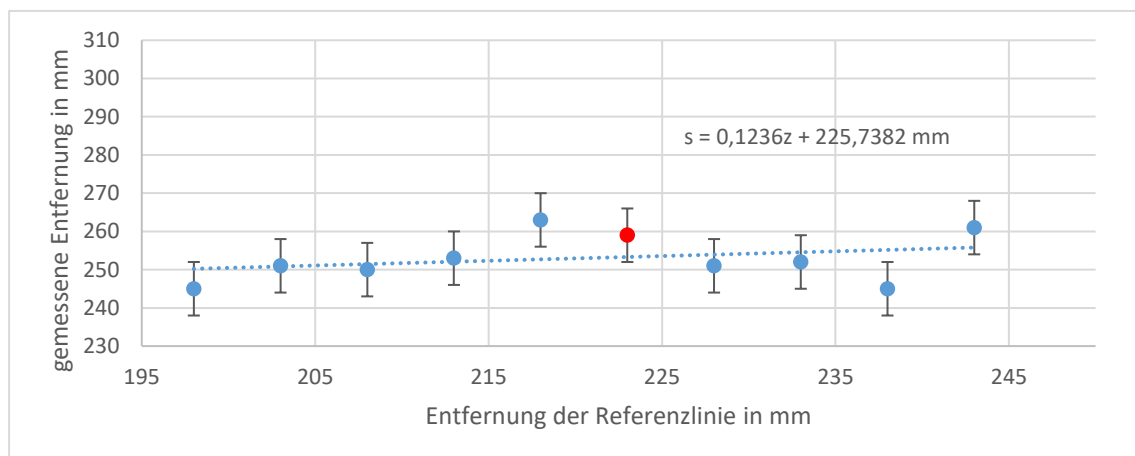


Abbildung 72: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit einer Brennweite von 200 mm mit Fokusabstand (rot)

Diese Korrelation weicht stärker von einer linearen Kennlinie ab als bei einer Brennweite von 280 mm. Neben der Brennweite haben sich auch die Reflexions- und Transmissionseigenschaften verändert. Für die Messung wurden ein anderes Objektiv und ein anderes Schutzglas verwendet. Um ein Indiz dafür zu finden, ob die veränderten Ergebnisse an der veränderten Brennweite oder den veränderten Transmissionseigenschaften liegen, wurde diese Kennlinie auch für die gleiche Brennweite ohne Schutzglas aufgenommen, wie Abb. 73 zeigt.

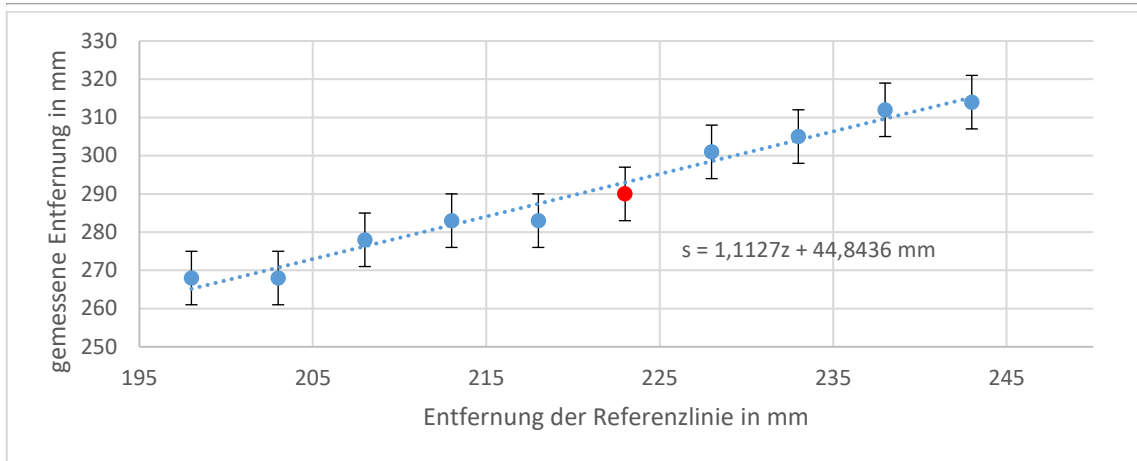


Abbildung 73: Kennlinienaufnahme bei OY1P303P0102 für Aluminium mit einer Brennweite von 200 mm ohne Schutzglas mit Fokusabstand (rot)

Diese Korrelation weicht ebenfalls stärker von der linearen Kennlinie ab als bei einer Brennweite von 280 mm. Allerdings ist unter diesen Bedingungen das Messgerät für eine Fokussagebestimmung einsetzbar. Im Produktionsbetrieb kann der Bearbeitungskopf nicht ohne Schutzglas eingesetzt werden. Da sich aber die Transmissionseigenschaften verschiedener Schutzgläser unterscheiden, könnte auch bei einer Brennweite von 200 mm das Messgerät für eine Fokussagebestimmung eingesetzt werden.

6.5.3 Aufnahme der Standardabweichung

Da die Wiederholgenauigkeit 1 mm beträgt, sind die Abweichungen relativ unproblematisch, wobei eine höhere Wiederholgenauigkeit zweckmäßig ist. Dazu wird in Abb. 74 untersucht, ob die Standardabweichung geringer ist als die im Datenblatt angegebene Wiederholgenauigkeit. Wenn die Angabe im Datenblatt gültig ist, ist dies der Fall.

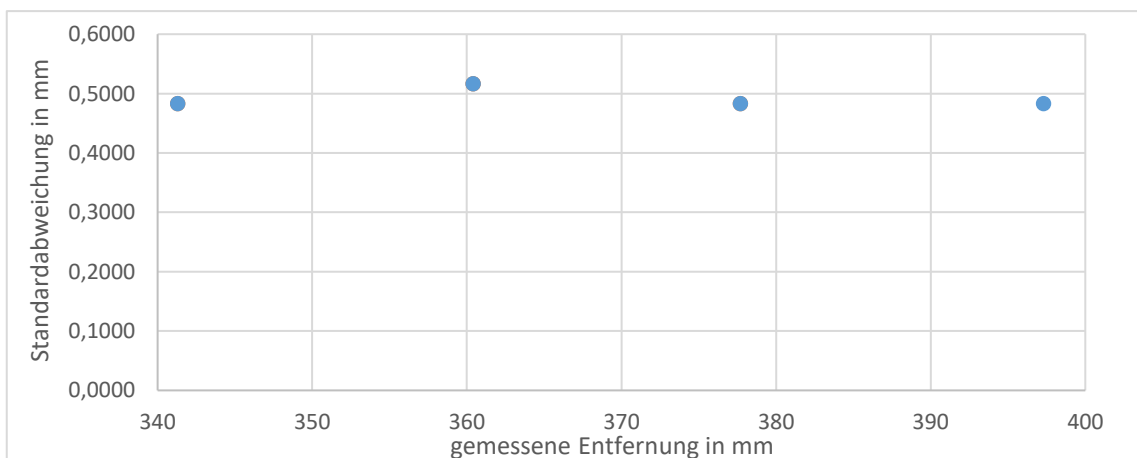


Abbildung 74: Aufnahme der Standardabweichung bei OY1P303P0102

Die Standardabweichung liegt stets im Bereich zwischen 0,45 mm und 0,55 mm. Solche Standardabweichungen sind typisch, wenn die Anzeigeauflösung 1 mm beträgt und die Messwerte zwischen zwei Zahlen schwanken. Somit sagt der genaue Wert der Standardabweichung nichts Exaktes über die tatsächliche Messgenauigkeit aus. Offensichtlich ist die Wiederholgenauigkeit erfüllt. Jedoch lässt sich nicht erfassen, welche Einflüsse die Standardabweichung beeinflussen. Zum Testen der grundlegenden Funktionsfähigkeit der Messung wird dennoch für eine Brennweite von 200 mm ohne Schutzglas die Standardabweichung aufgenommen, wie Abb. 75 zeigt.

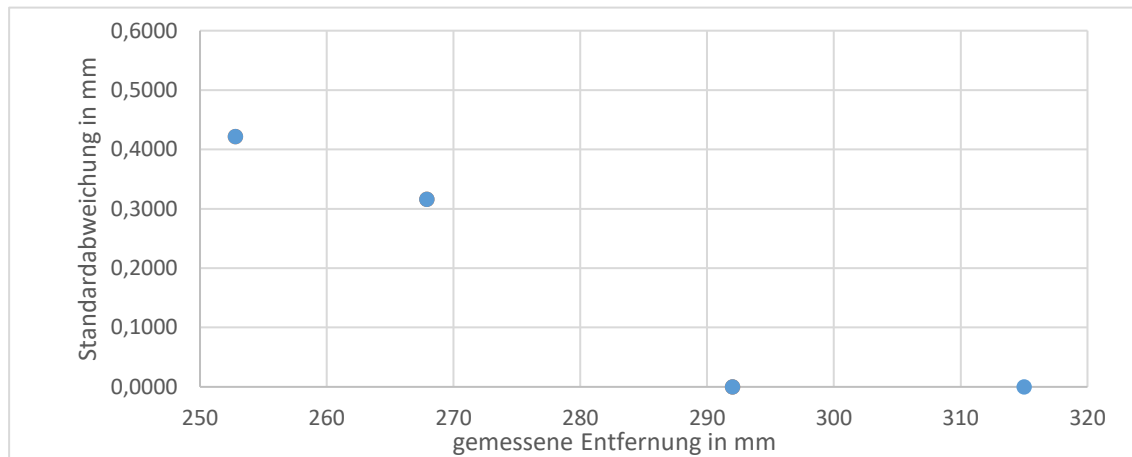


Abbildung 75: Aufnahme der Standardabweichung bei OY1P303P0102 bei einer Brennweite von 200 mm

Dabei zeigt sich die Tendenz, dass dabei die Standardabweichung geringer ist als in Abb. 74. Die in Abb. 74 gezeigten Messreihen wurden bei einer Brennweite von 280 mm aufgenommen. Bisher wurden so geringe Standardabweichungen wie in den Abb. 74 und 75 noch nicht bei einem Messgerät mit einem Datenausgang und einer Versorgung mit einer Spannung von 24 V erreicht, wenn damit der Fokusabstand ausgemessen werden kann.

6.5.4 Einfluss des Winkels

Ähnlich wie bei den anderen Entfernungsmessgeräten wird für das OY1P303P0102 der Einfluss des Winkels auf das Messergebnis untersucht. Dies ist in Abb. 76 dargestellt.

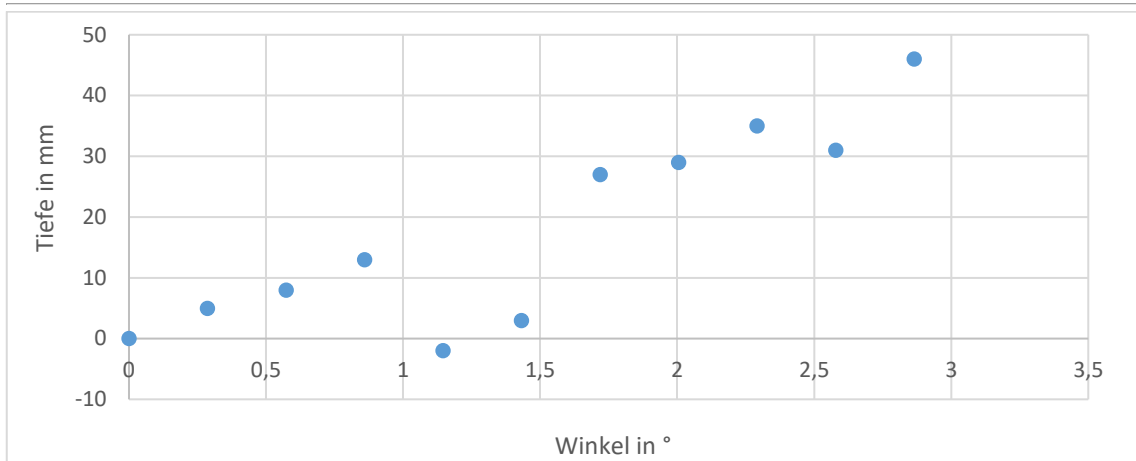


Abbildung 76: Winkelabhängigkeit bei OY1P303P0102

Dabei ist ein ähnlicher Effekt wie beim ODSIL 96B zu beobachten. Auf eine Überprüfung der Standardabweichung wird verzichtet. Zum einen wurde bereits erwähnt, dass bei diesem Messgerät die Einflüsse auf die Standardabweichung kaum feststellbar sind. Außerdem ist die Messung bei einer nicht senkrechten Einstrahlung offensichtlich nicht möglich, daher muss dafür auch nicht die Wiederholgenauigkeit bekannt sein. Da bei allen getesteten Messgeräten solche Unterschiede bezüglich des Messwertes in Abhängigkeit vom Winkel aufgetreten sind, ist davon auszugehen, dass die Entfernungsmessung durch einen Bearbeitungskopf hindurch allgemein nur bei einer senkrechten Einstrahlung funktioniert. Das bedeutet, dass dies kein Ausschlusskriterium für dieses Messgerät ist. Alle anderen bisher getesteten Messgeräte weisen allerdings Ausschlusskriterien auf. Daher wird dieses Messgerät ausgewählt. Als Grund für die Nichtmessbarkeit bei nicht senkrechter Einstrahlung wird die veränderte Brechung durch die Fokussierlinse vermutet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die Möglichkeit der Verwendung einer optischen Abstandsmessung für das Ausmessen des Fokusabstandes wurde bereits bei vorhergehenden Untersuchungen mit einem positiven Ergebnis überprüft und nun weiterentwickelt. Grundsätzlich wurden Messgeräte mit einer höheren Genauigkeit gefunden. Diese können jedoch nicht für eine Fokuslagebestimmung eingesetzt werden. Das Ziel einer Messgenauigkeit von 0,1 mm wurde nicht erreicht. Allerdings wurde ein Messgerät gefunden, was für eine Fokuslagebestimmung unter bestimmten Bedingungen eingesetzt werden kann. Dieses verfügt über einen Datenausgang und einen Stromanschluss, der dieses unabhängig von Batterien macht. Vorteile gegenüber den Ergebnissen unter [1] bestehen also. Dennoch sind die Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. Das Ziel der Arbeit wurde also teilweise erreicht.

Im Rahmen der Konstruktion der mechanischen Vorrichtung zur Befestigung und wiederholgenauen Positionierung wurde gezeigt, dass die gleichzeitige Verwendung des Beobachtungsarmes und des Entfernungsmessgerätes möglich ist. Die mechanische Vorrichtung, die das ermöglicht, wurde parallel zur an die untersuchten Messgeräte angepassten Variante einer vorher entwickelten Vorrichtung getestet. Bezüglich der Messgenauigkeit ist keine eindeutige Aussage darüber möglich, welche der beiden Vorrichtungen eine höhere Wiederholgenauigkeit ermöglicht. Jedoch ist die gleichzeitige Verwendung des Beobachtungsarmes und des Entfernungsmessgerätes ein eindeutiger Vorteil von der Vorrichtung, die dies ermöglicht. Daher wird diese Vorrichtung ausgewählt. Dabei bestehen Einschränkungen der wiederholgenauen Positionierung und der Flexibilität und Wiederholbarkeit von Messungen. Für diese existiert aber bereits ein Konzept zur Behebung. Auf die Konstruktion eines Gehäuses konnte verzichtet werden, da das Konzept zur Behebung der angesprochenen Einschränkungen das Innere des Bearbeitungskopfes bereits vor Staub und anderen Umwelteinflüssen schützt. Dies muss beachtet werden, um zu vermeiden, dass Staub und Partikel an den für die Messlaserstrahlung geschaffenen Öffnungen eintreten.

Eine indirekte Vermessung des Fokusabstands erlaubt, wenn sie mittels des LAS-T5 realisiert wird, eine präzisere Einstellung desselben als eine direkte Messung per Laufzeitmessung. Allerdings ist dies dann nicht in Echtzeit möglich. Bei dieser Variante wurden höhere Genauigkeiten erreicht werden. Die Möglichkeit der automatischen Anpassung des Fokusabstandes während der Bearbeitung hat bei der Auswahl jedoch Vorrang.

Bei der steuerungstechnischen Integration wurden einige Ansätze gefunden. Theoretisch würden sich komplette Steuereinheiten einbauen und an komplette Geräte anschließen lassen. Der Grund, warum dies noch nicht umgesetzt wurde, ist der vorgegebene Selbstkostenpreis. Auch die Programmierung mittels MATLAB wird nicht mit einer Steuerung verknüpft, da dafür Lizenzgebühren anfallen würden, die ebenfalls die Einhaltung des Selbstkostenpreises erschweren würden. Jedoch gibt es verschiedene Konzepte, wie eine Steuerung auf der Grundlage der Entfernungsmesswerte umgesetzt werden kann. Ist dies erfolgt, führen weder Unebenheiten noch Krümmungen der Proben- oder Werkstückoberfläche zu einem Intensitätsverlust. Die Qualität der Bearbeitung steigt damit. Die Nullung des Messsystems würde mit der Umsetzung dieses Steuerungskonzeptes einhergehen.

Bezüglich des Erreichens des Forschungszieles unter Umsetzung des Genauigkeitszieles entstanden Herausforderungen, die bei der Lösung unter [1] nicht aufgetreten sind. Bei Triangulationsmessgeräten wird der Messwert durch die Brechung verfälscht. Dadurch wird der Messbereich so weit eingeschränkt, dass die Vermessung des Fokusabstandes lediglich indirekt oder nicht koaxial zur Bearbeitungslaserstrahlung möglich ist. Auch bei anderen Messgeräten kann die Brechung zu einer Verfälschung des Messwertes führen. Auch die Interpretation von Oberflächen der Optiken als zu vermessende Flächen kann nicht immer verhindert werden. Beim OY1P303P0102 wurde jedoch nicht in jedem Fall die wiederholgenaue Messbarkeit des Fokusabstandes dadurch verhindert. Auf Oberflächen mit einer relativ hohen Reflektivität kann dieses Messgerät dafür angewendet werden. Die Vermutung, dass eine rauere Oberfläche zu einer geringeren Wiederholgenauigkeit bei der Messung führt, wurde teilweise bestätigt. Der Einfluss des Winkels auf die Wiederholgenauigkeit unterscheidet sich bei jedem Messgerät. Jedoch verfälscht ein veränderter Winkel das Messergebnis. Wenn zwischen der gemessenen Spannung und der Entfernung eine Kennlinie aufgenommen wurde, wird diese auch verfälscht. Daher muss die Messlaserstrahlung senkrecht zur Probenoberfläche eingestrahlt werden. Für die Detektion von Krümmungen ist dieses Fokussuchesystem nicht geeignet. Hingegen kann es für die Detektion von stufenförmigen Topografieänderungen verwendet werden.

Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Wahl der Laufzeitmessung als angewendetes Entfernungsmessverfahren
- Wahl des Messgerätes OY1P303P0102 für die Fokusslagebestimmung
- Möglichkeit der teilweisen Anwendung des Messgerätes zur Fokussuche
- Nutzung der Vorrichtung, die die gleichzeitige Verwendung des Beobachtungsarmes und des Entfernungsmessgerätes ermöglicht
- Möglichkeit der Datenübertragung an eine Schnittstelle
- Stromversorgung mit einer Spannung von 24 V aus der Laseranlage herstellbar
- verschiedene Konzeptlösungen zur Automatisierung

7.2 Ausblick

Unter Berücksichtigung aller Abstandsmessverfahren gibt es noch eine Vielzahl weiterer Messgeräte. Auch innerhalb der Lasertriangulation und der Laufzeitmessung existieren noch weitere Messgeräte. Bei nachfolgenden Untersuchungen kann recherchiert werden, ob es ein weiteres Messgerät mit einem geeigneten Kosten-Nutzen-Verhältnis gibt. Nach der Überprüfung von dessen Anwendbarkeit kann über die kostenpflichtige Beschaffung des OY1P303P0102 entschieden werden. Bisher ist dieses Messgerät als eine Möglichkeit zur Umsetzung der automatischen Fokussuche vorgemerkt. Über das Zusammenfügen verschiedener Einzelteile von Messgeräten können ebenfalls Anwendbarkeit und Kosten optimiert werden. Dieses Konzept wird dadurch eingeschränkt, dass verschiedene Einzelteile nicht in beliebigen Kombinationen und nicht auf beliebige Art zusammengefügt werden können.

Auch bei einer steuerungstechnischen Integration ist eine Vielzahl verschiedener Methoden möglich. Die Kenntnisse in den dazugehörigen Programmiersprachen sind ein erforderliches Kriterium für die Umsetzung dieser Möglichkeiten. Zu beachten ist auch, dass diese Methoden sich in ihrer Geschwindigkeit unterscheiden. Erfolgt ein Eingriff in die Steuerung während des Prozesses, muss die Frequenz höher gewählt werden als bei einem Eingriff vor Beginn des Prozesses.

Als grundlegende mechanische Integrationsvarianten sind die ursprünglich vorgesehene Variante durch den Bearbeitungskopf hindurch und die ebenfalls mögliche Variante parallel dazu genannt worden. Bei zukünftigen Untersuchungen könnten beide Varianten aufgebaut und experimentell miteinander verglichen werden, wobei die Vor- und Nachteile auch ohne den Aufbau beider Varianten ersichtlich sind. Auch die Verwendung weiterer Vorrichtungen ist möglich. Ein neues Konzept dazu ist die Verwendung von zwei würfelförmigen Verdickungen, wobei sich in beiden davon jeweils ein Teilerspiegel befindet. Von einem Teilerspiegel aus wird die Entfernung zur Probenoberfläche gemessen und die Differenz zwischen beiden Teilerspiegeln wird gemessen. Somit wird von beiden Teilerspiegeln aus die Entfernung der Probenoberfläche ermittelt. Dieses Konzept ist als Reihenschaltung zweier Würfel aufzufassen. Weiterhin ist das Ziel einer erweiterten mechanischen Integration die Durchstrahlung des Beobachtungsarmes.

Anlagen

Anlage 1: Bilder der Gerätetechnik	XIV
Anlage 1.1: Weitere Entfernungsmesser	XIV
Anlage 1.2: Verarbeitung des Messsignals	XVII
Anlage 2: Transmissionskurven	XVIII
Anlage 3: Technische Zeichnungen der Vorrichtungsteile	XXIII
Anlage 3.1: Einzelteile Vorrichtung für die Seiteneinstrahlung.....	XXIII
Anlage 3.2: Einzelteile Vorrichtung für senkrechte Einstrahlung.....	XXIX
Anlage 3.3: Befestigung Messung parallel zu Bearbeitungskopf	XXXI
Anlage 3.4: Einzelteile Vorrichtung für opt. Seiteneinstrahlung	XXXII
Anlage 4: Quellcode für die Steuerung der Laserachsen	XXXIV

Anlage 1: Bilder der Gerätetechnik

Anlage 1.1: Weitere Entfernungsmesser



Abbildung 77: Messgerät OM70 [33]



Abbildung 78: Messgerät optoNCDT 1420 [34]



Abbildung 79: Messgerät OY1P303P0102 [29]



Abbildung 80: Messgerät BOD 23K-LA01-S92 [35]



Abbildung 81: Messgerät ODKL 96B bzw. ODSIL 96B [36]

Anlage 1.2: Verarbeitung des Messsignals



Abbildung 82: TRUE-RMS-Messgerät UT61D mit USB [26]



Abbildung 83: TRMS-Multimeter Ironmeter [27]



Abbildung 84: Auto-Ranging Multimeter PCE-EM886 [28]

Anlage 2: Transmissionskurven

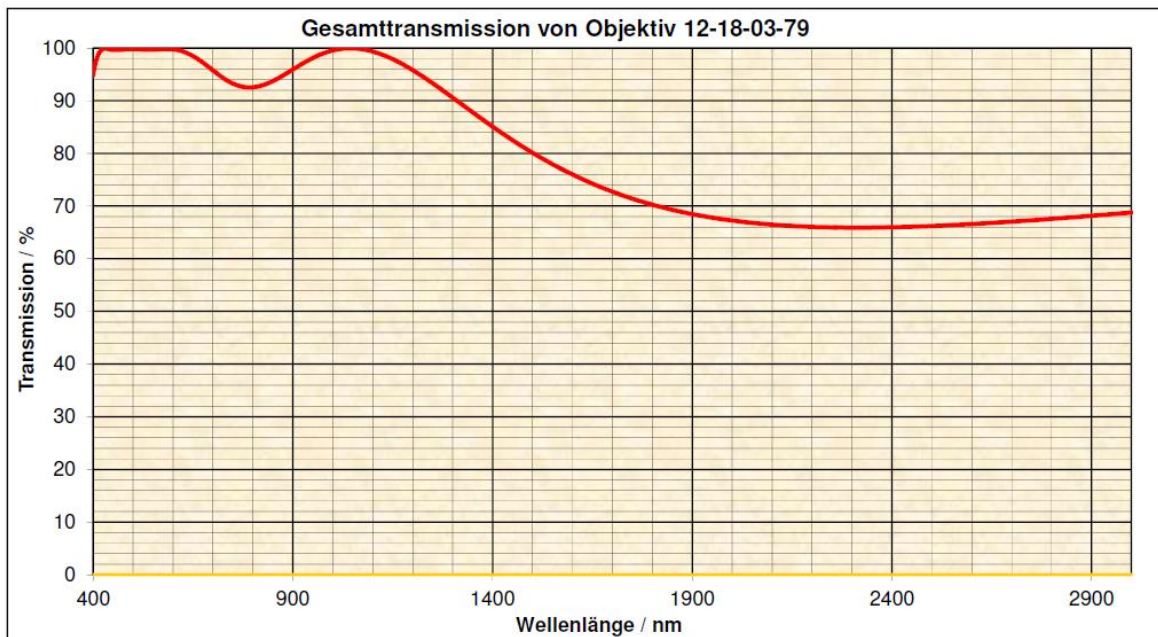


Abbildung 85: Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlagen LS 64 C und LWS-P1000 (Nummer oben: firmeneigene Nummerierung der Firma Trumpf), Quelle: Trumpf

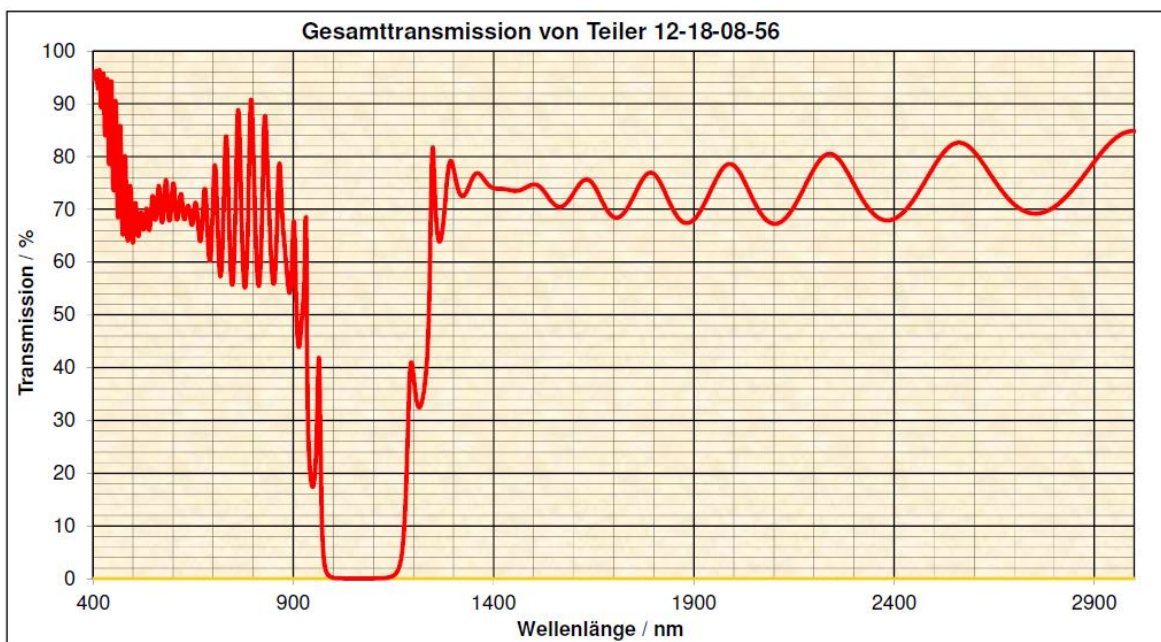


Abbildung 86: Transmissionskurve Objektiv der Laseranlagen LS 64 C, LWS-P1000, LWS-C, LS 108 CI und SYSLAS, Quelle: Trumpf

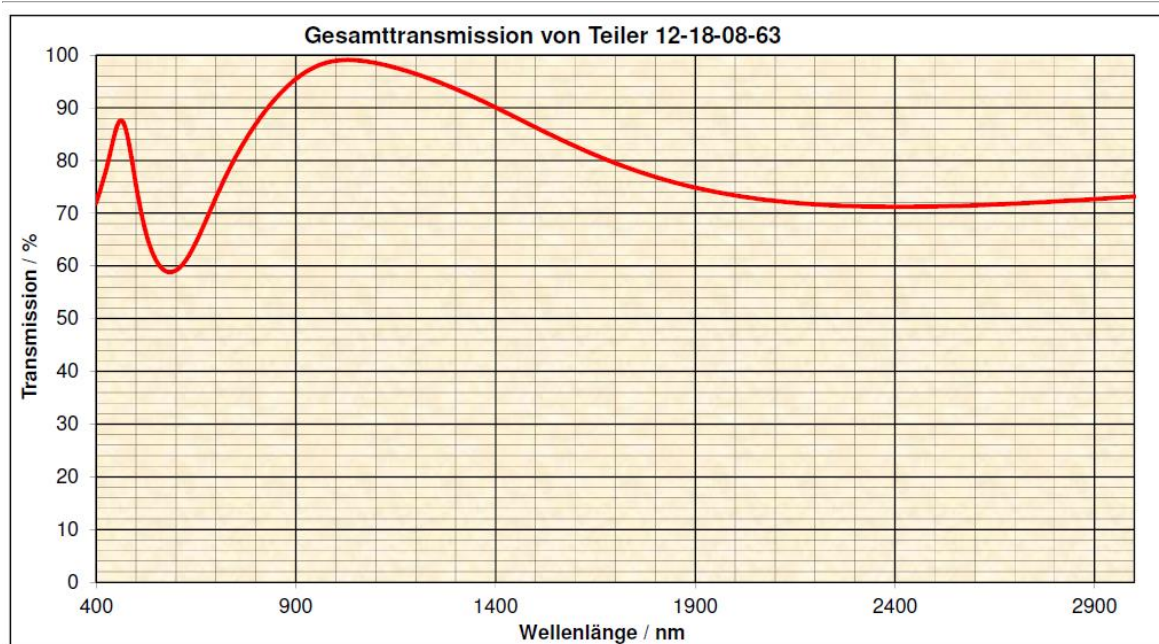


Abbildung 87: Transmissionskurve Schutzglas der Laseranlagen LS 64 C, LWS-C, LS 108 CI und LWS-P1000, Quelle: Trumpf

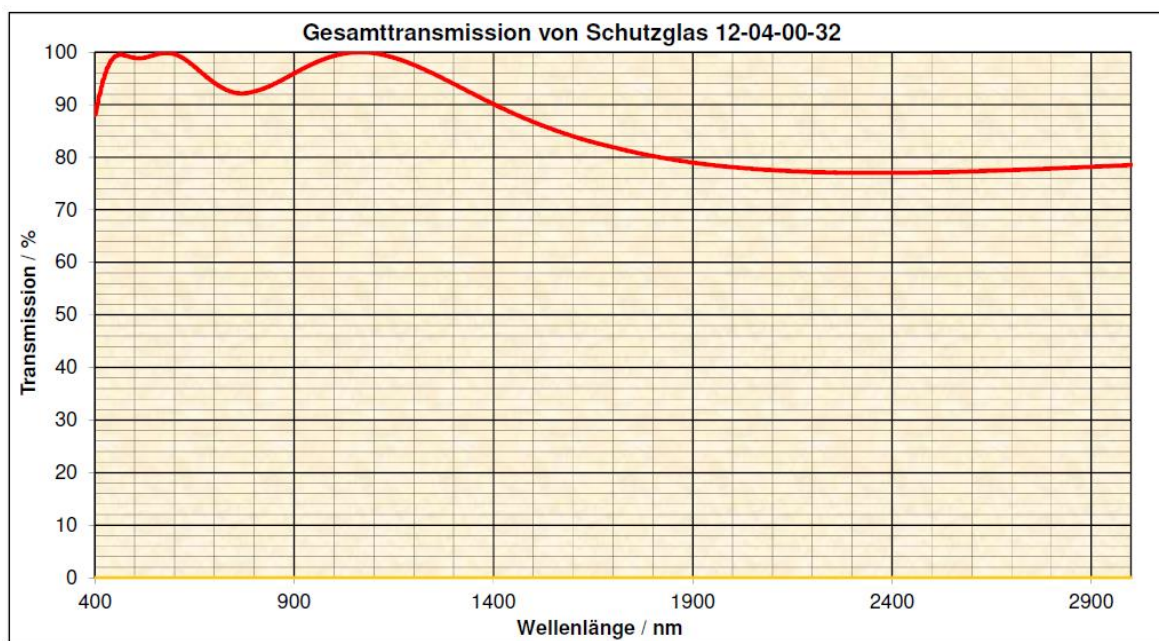


Abbildung 88: Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlage SYSLAS, Quelle: Trumpf

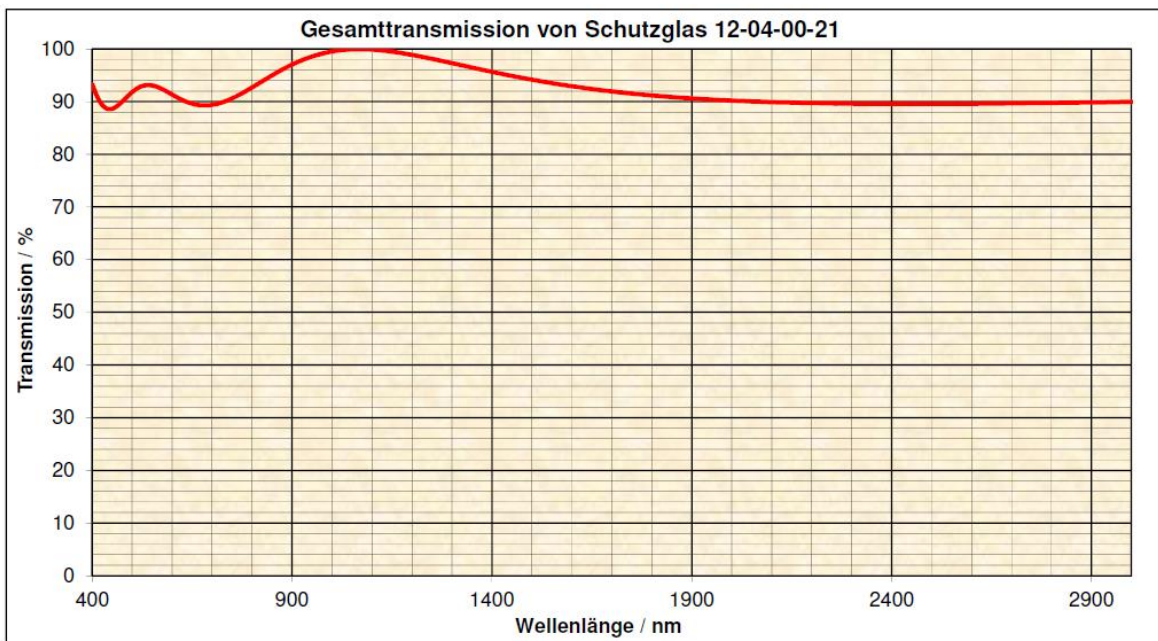


Abbildung 89: Transmissionskurve Schutzglas SYSLAS, Quelle: Trumpf

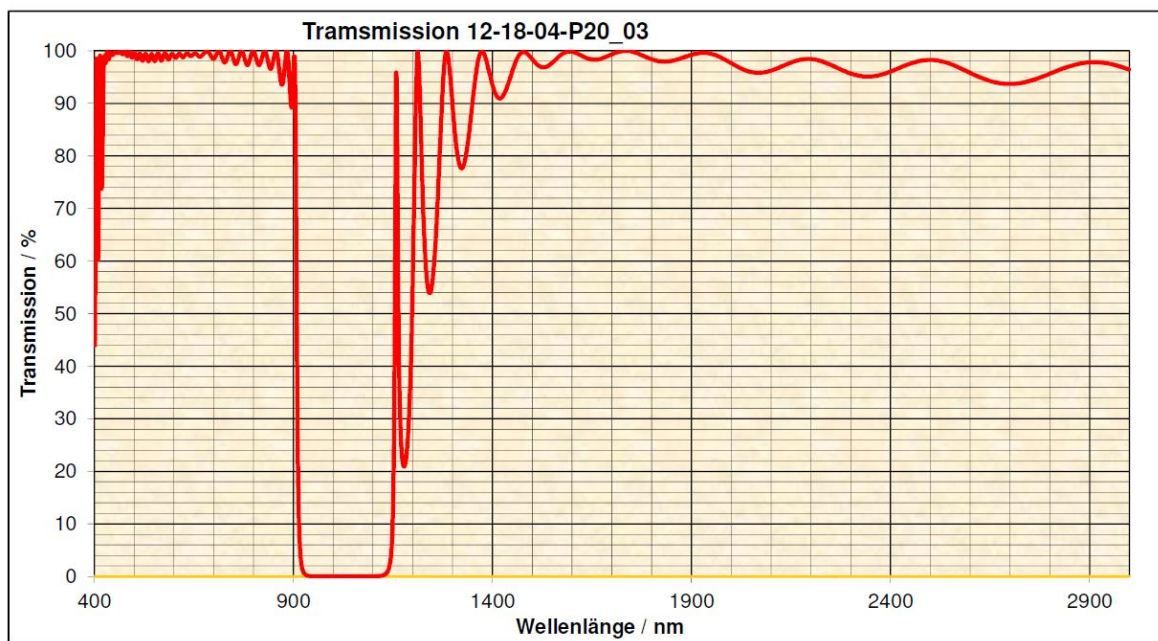


Abbildung 90: Transmissionskurve Kantenfilter der Laseranlagen LWS-C und LS 108 CI, Quelle: Trumpf

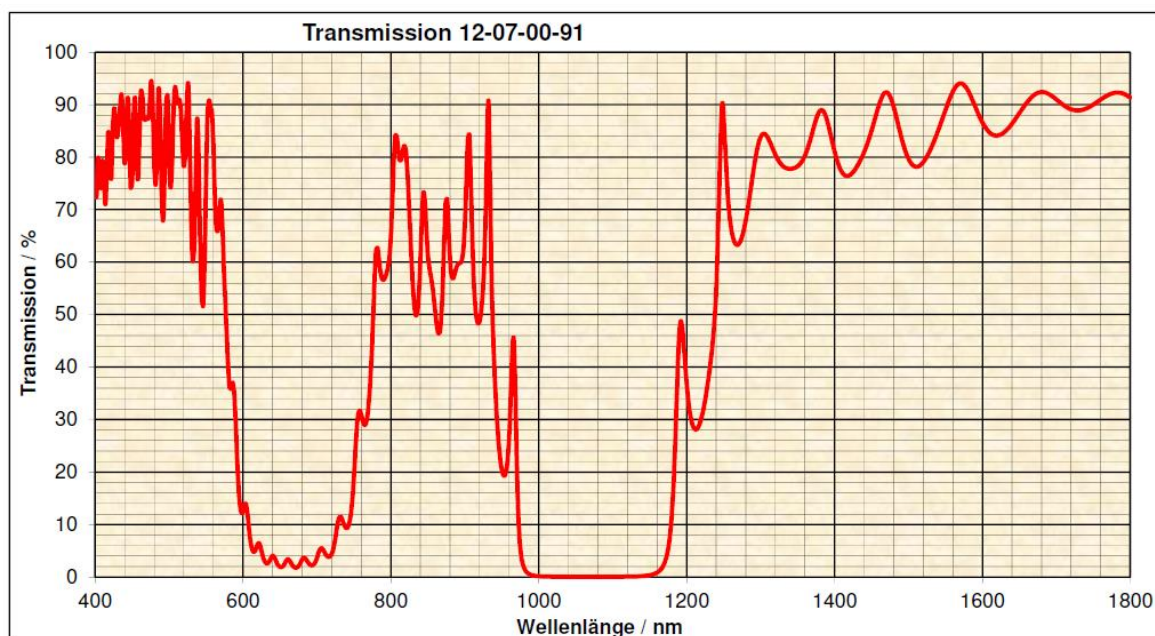


Abbildung 91: Transmissionskurve erster Teilerspiegel der Laseranlage LS 108 CI, Quelle: Trumpf

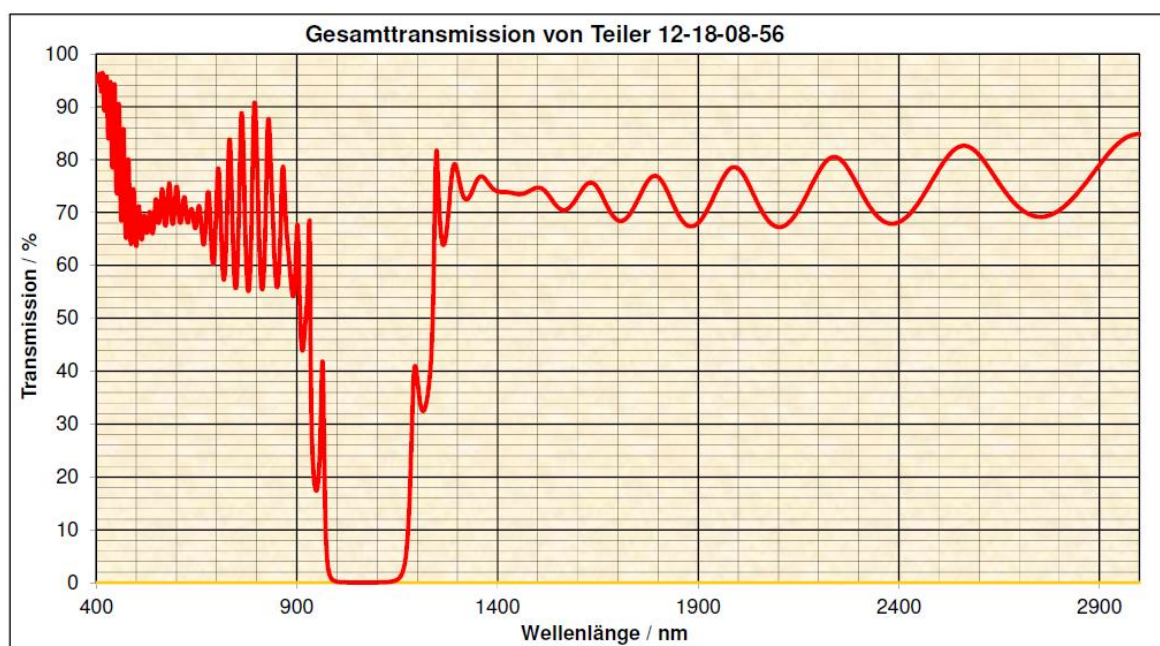


Abbildung 92: Transmissionskurve zweiter Teilerspiegel der Laseranlage LS 108 CI, Quelle: Trumpf

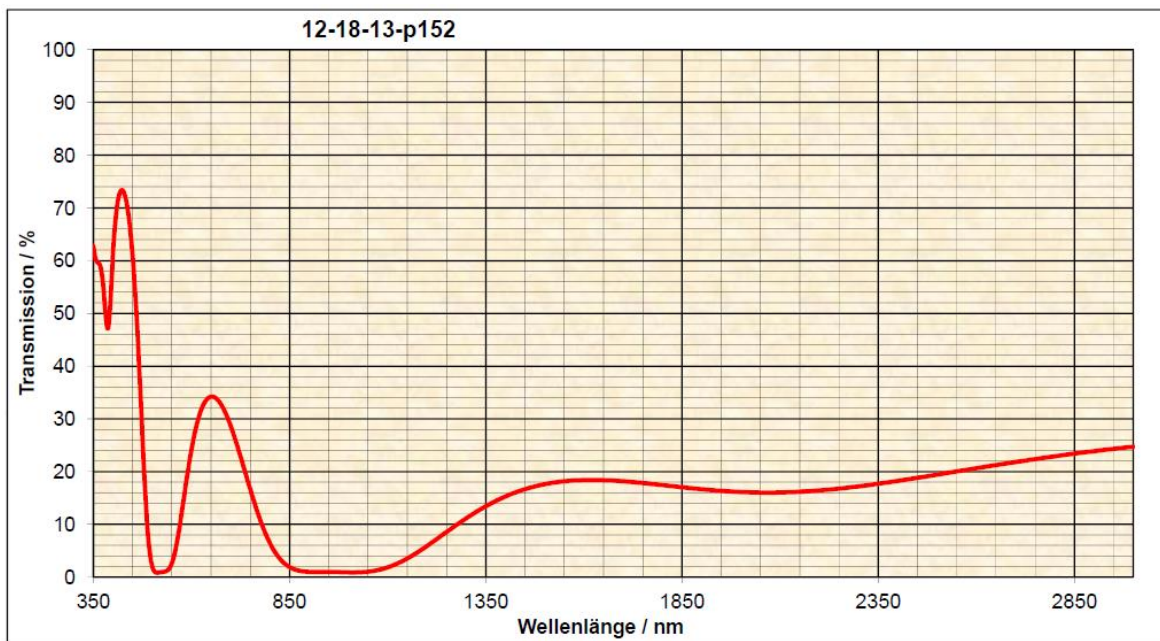


Abbildung 93: Transmissionskurve Teilerspiegel der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf

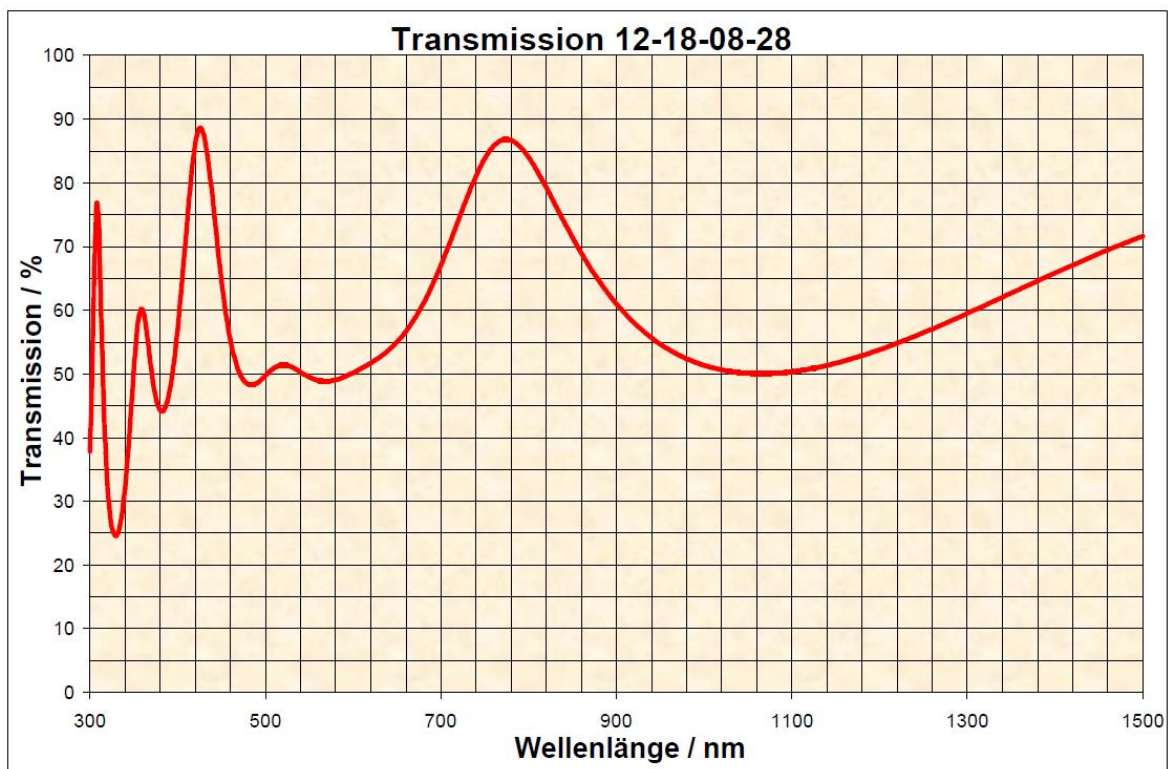


Abbildung 94: Transmissionskurve Teilerspiegel Sensorarm der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf

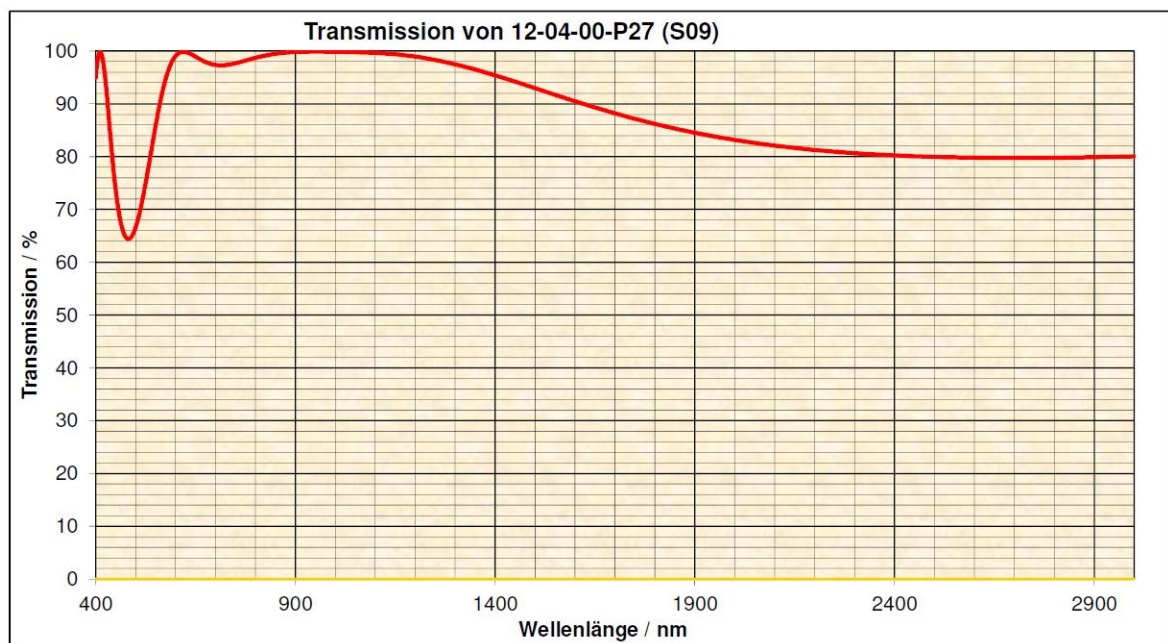


Abbildung 95: Transmissionskurve Objektiv der Laseranlagen LWS-DM4 -und DM5, Quelle: Trumpf

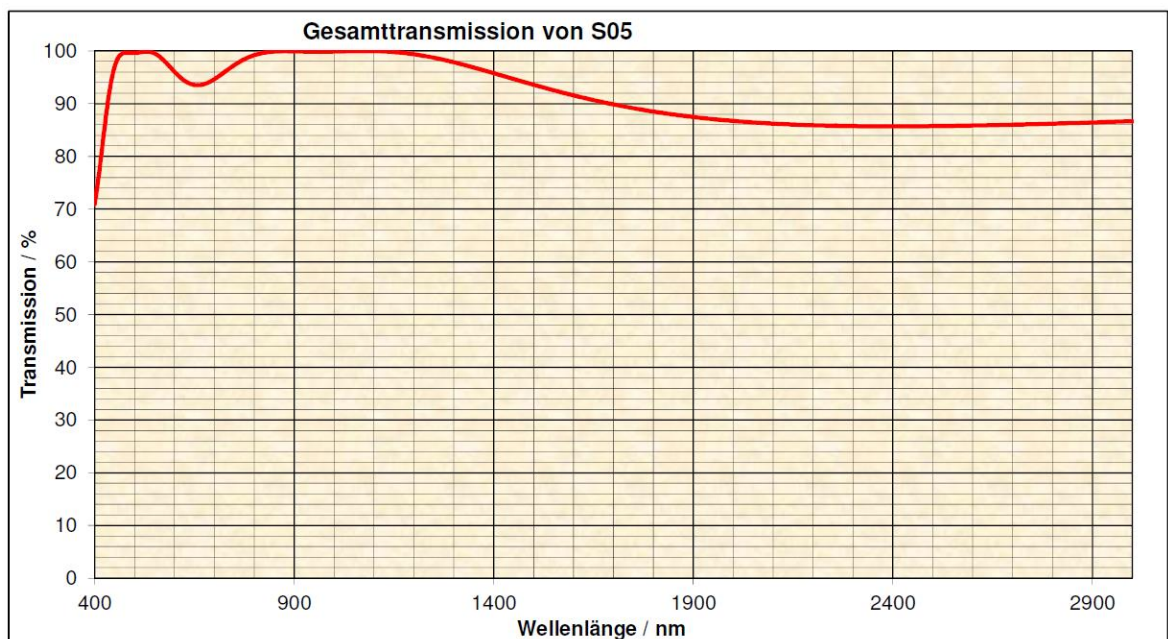


Abbildung 96: Transmissionskurve Schutzglas der Laseranlagen LWS-DM4 und -DM5, Quelle: Trumpf

Anlage 3: Technische Zeichnungen der Vorrichtungsteile

Anlage 3.1: Einzelteile Vorrichtung für die Seiteneinstrahlung

Alle Einzelteile dieser Vorrichtung werden dargestellt.

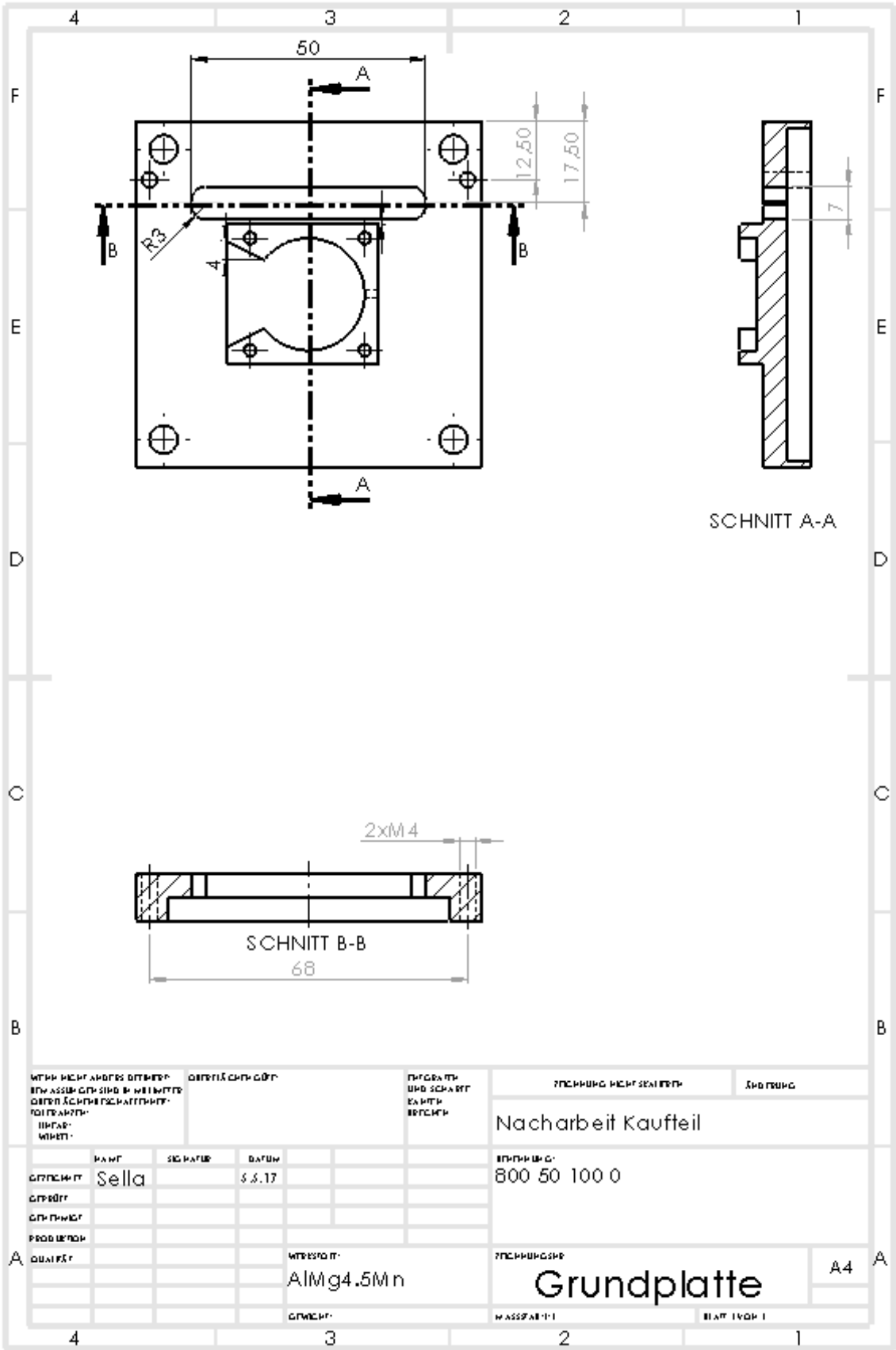


Abbildung 97: Technische Zeichnung Grundplatte Seiteneinstrahlung

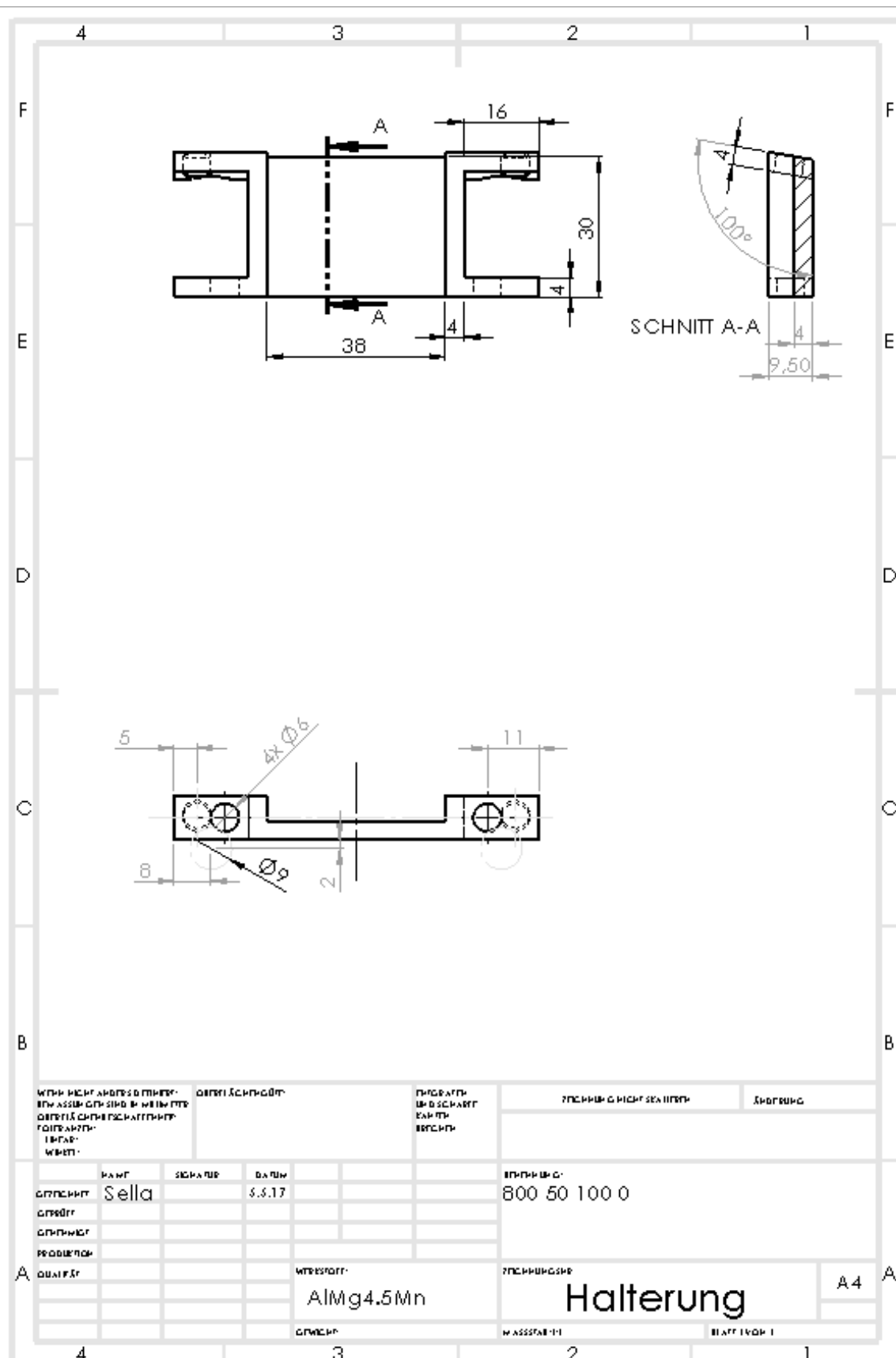


Abbildung 98: Technische Zeichnung Halterung

Abbildung 99: Technische Zeichnung Auflageplatte

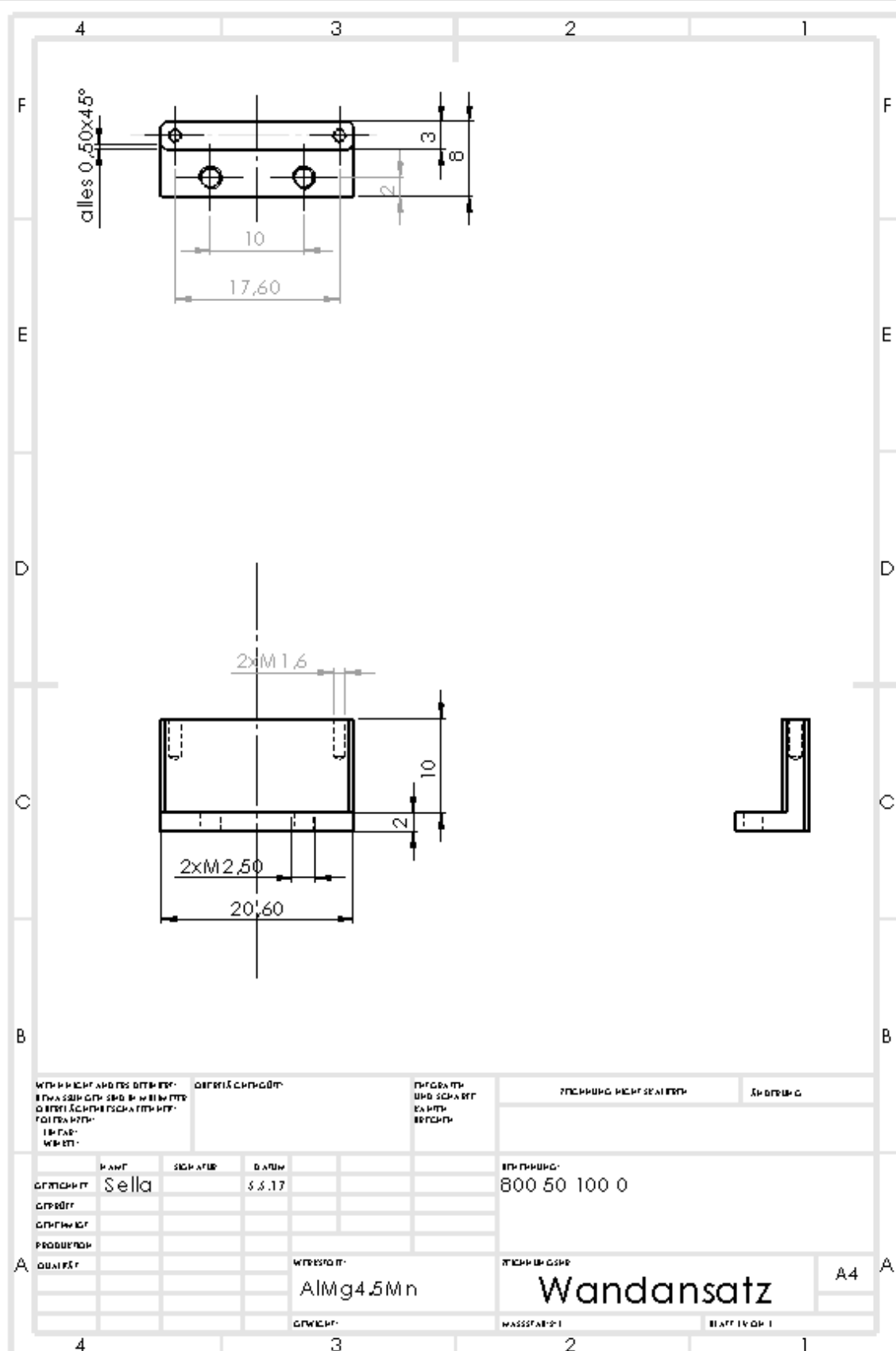


Abbildung 100: Technische Zeichnung Wandansatz

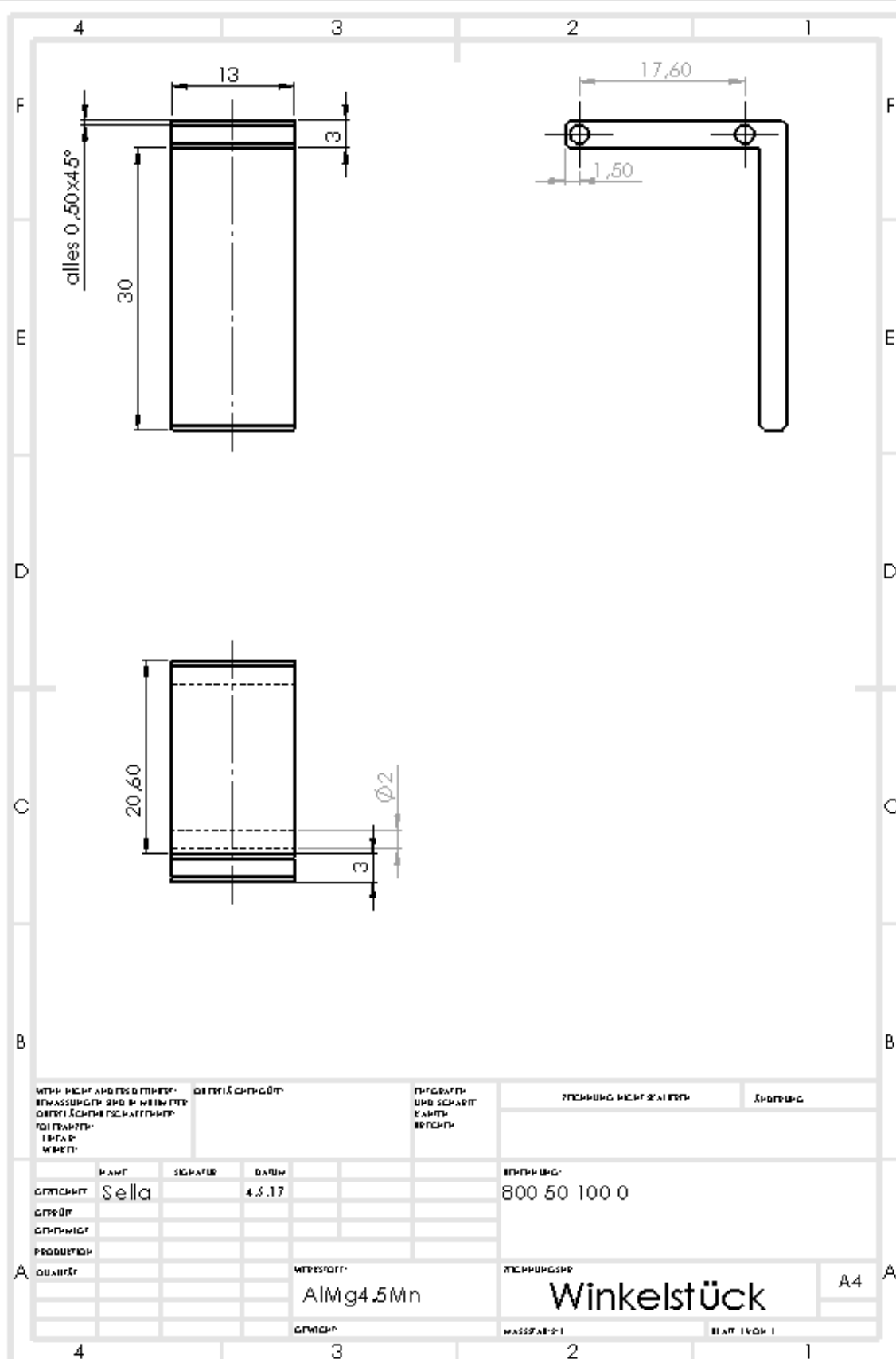


Abbildung 101: Technische Zeichnung Winkelstück

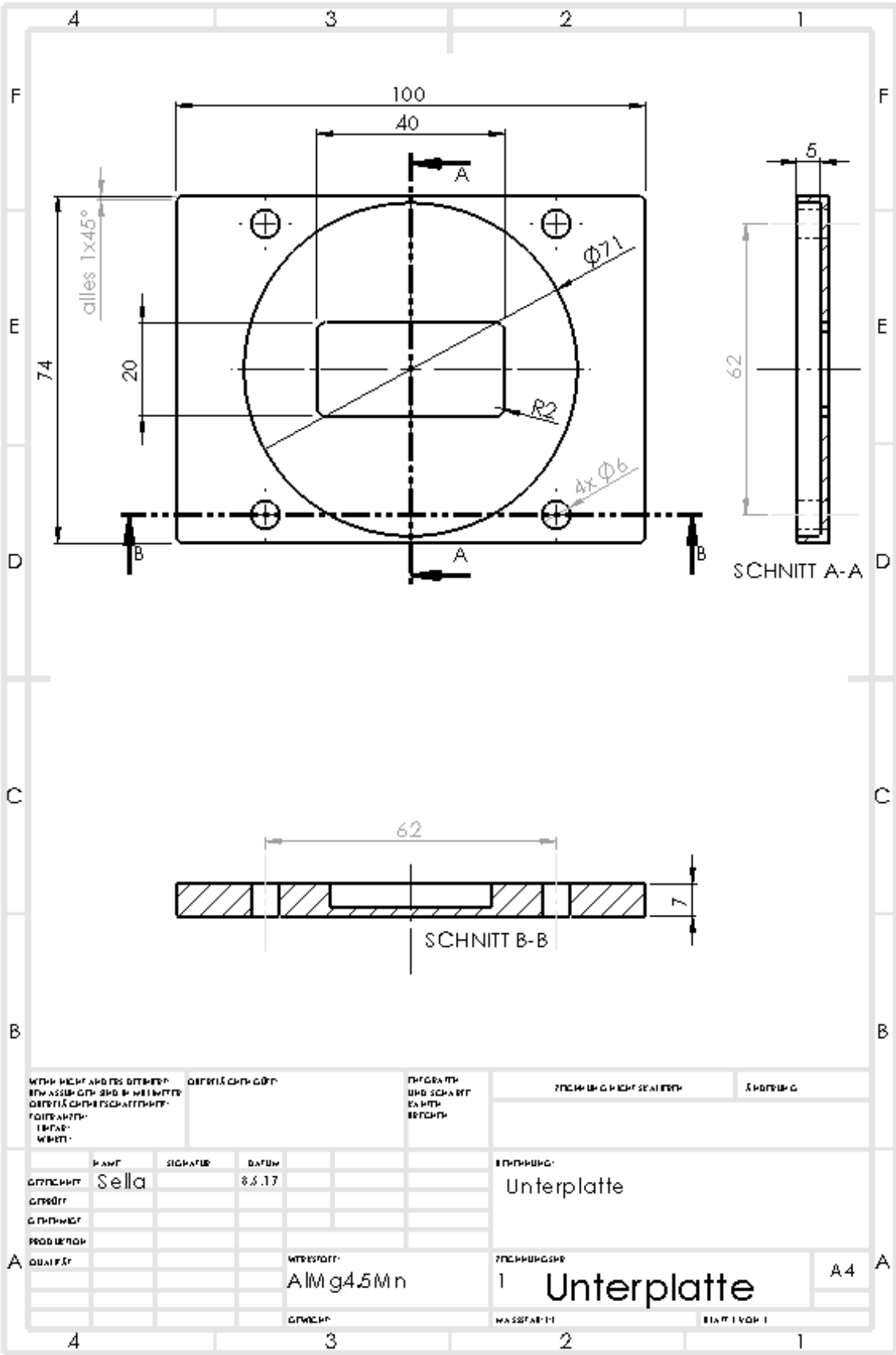


Abbildung 103: Technische Zeichnung Unterplatte

Anlage 3.3: Befestigung Messung parallel zu Bearbeitungskopf

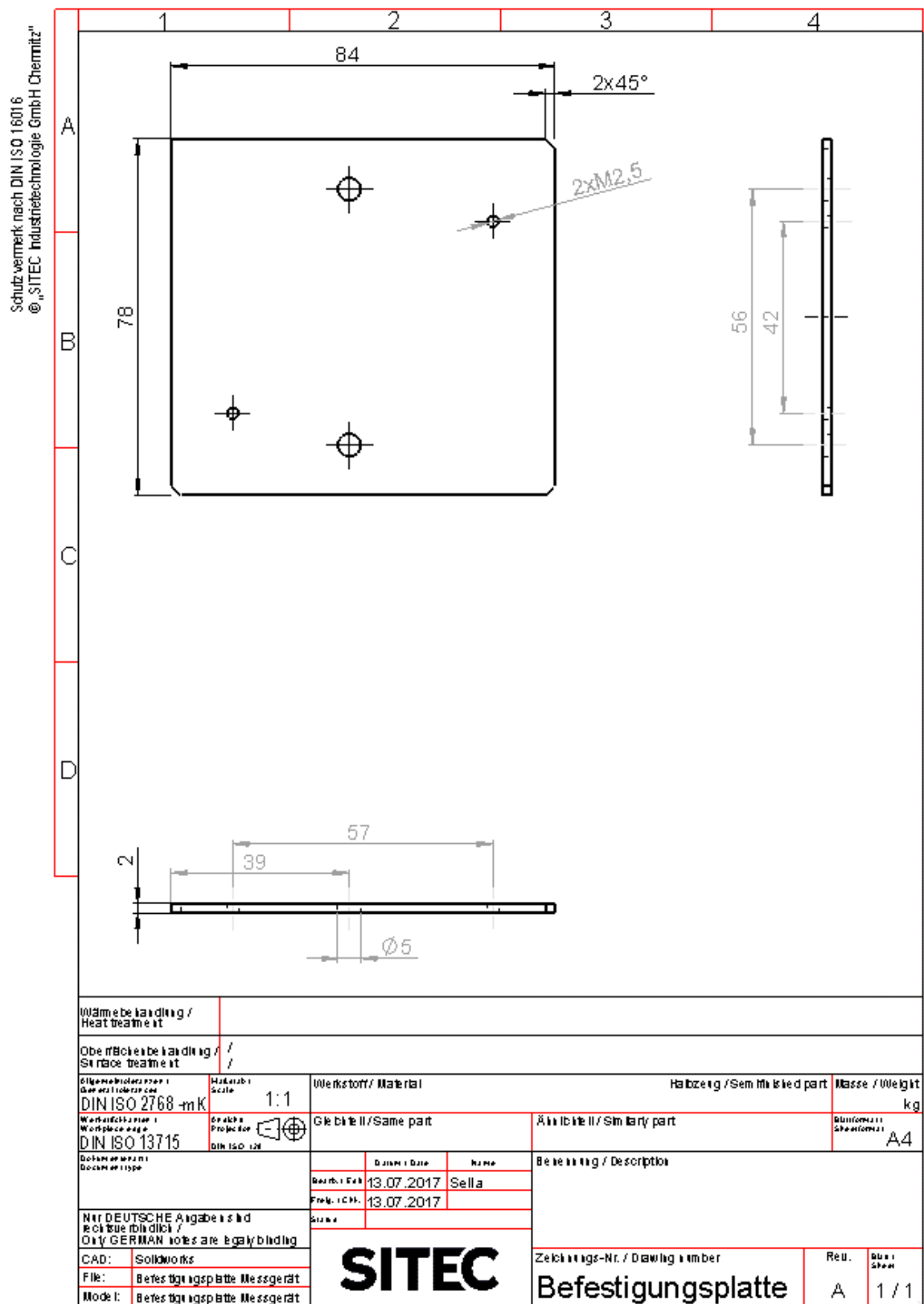


Abbildung 104: Technische Zeichnung Befestigungsplatte

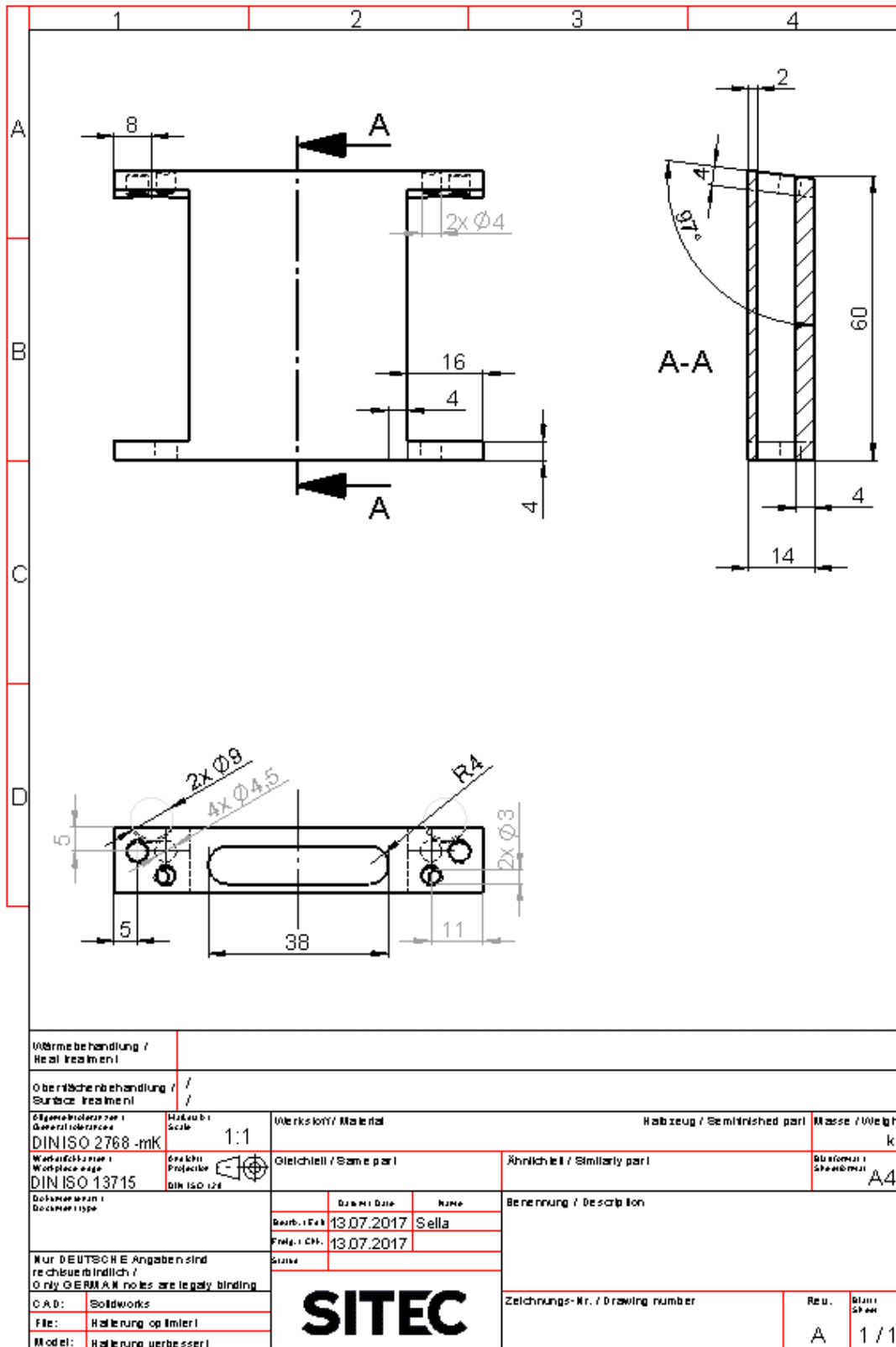


Abbildung 105: Technische Zeichnung Halterung optimiert

Anlage 3.4: Einzelteile Vorrichtung für opt. Seiteneinstrahlung

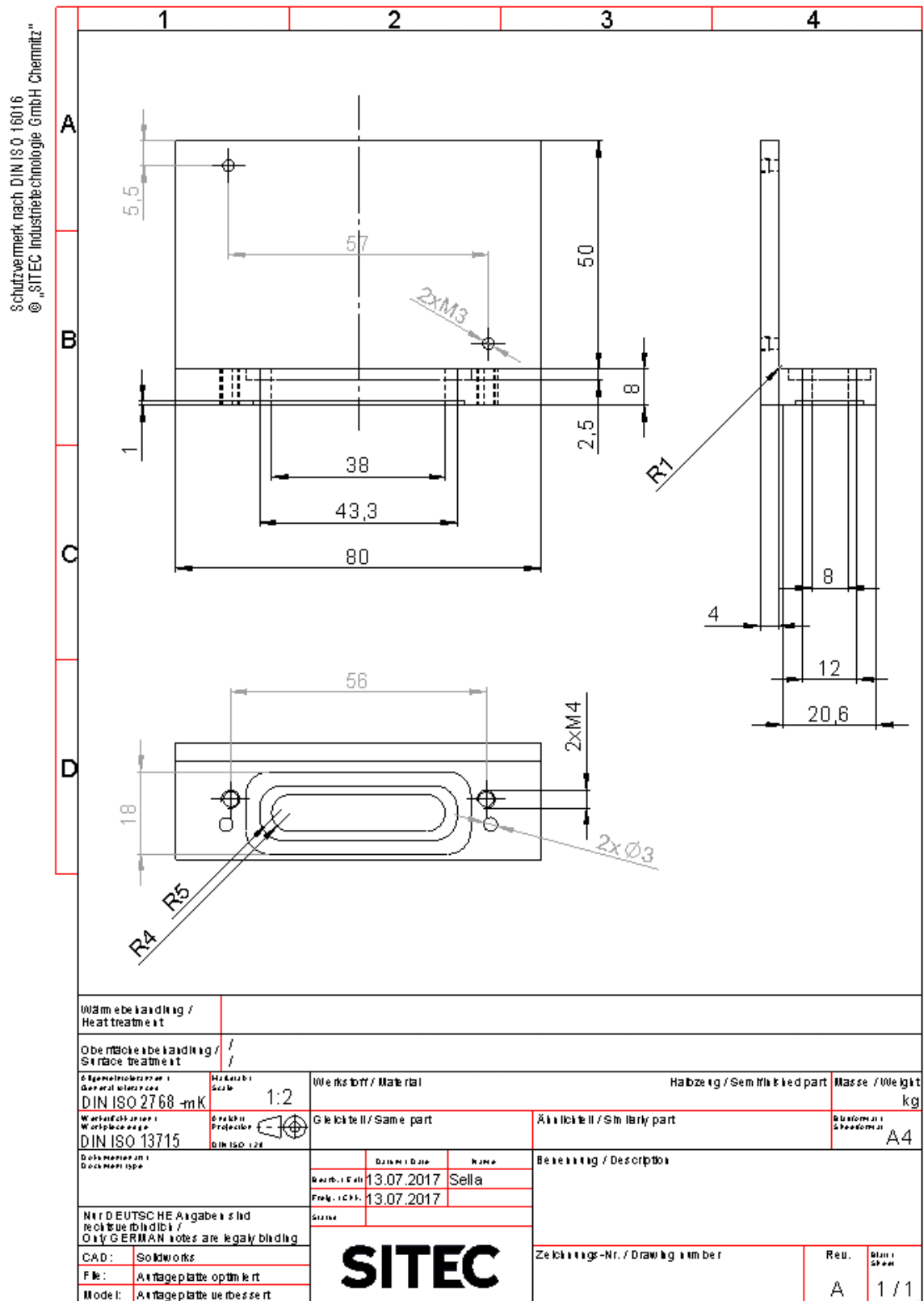


Abbildung 106: Technische Zeichnung Auflageplatte optimiert

Weitere verwendete Einzelteile mussten nicht neu konstruiert werden und werden deshalb nicht dargestellt. (ebenso in Anlage 3.2)

Anlage 4: Quellcode für die Steuerung der Laserachsen

```
function Steuerung_der_Laserachsen_erweitert
clear;

% Parameter für Positionen der Fenster
xA=0.1;
yA=0.8;
dx=0.3;
dy=0.1;

% Erzeugung der grafischen Ausgabe
figure('color','w')
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA dx
dy],'string','Messwert','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[xA+dx yA dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','m');
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA-dy dx
dy],'string','z-Wert Anfang','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[xA+dx yA-dy dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','zAnf');
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA-2*dy dx
dy],'string','z-Wert Ende','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[xA+dx yA-2*dy
dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','zEnd');
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA-3*dy dx
dy],'string','manuell','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','checkbox','units','normalized','position',[xA+dx yA-
3*dy dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','manuell');
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA-4*dy dx
dy],'string','Anzahl 100 µm nach oben','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[xA+dx yA-4*dy
dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','a');
uicontrol('style','text','units','normalized','position',[xA yA-5*dy dx
dy],'string','Anzahl 100 µm nach unten','FontSize',15,'background','w');
uicontrol('style','edit','units','normalized','position',[xA+dx yA-5*dy
dx
dy],'string','', 'FontSize',15,'background','w','callback',@Steuerung,'tag
','b');

handles=guihandles(gcf);
function Steuerung(~,~)
    if handles.manuell.Value==0
        m=load('Messwert.txt'); % Laden des Messwertes in das Programm
    else
        m=str2double(handles.m.String); % manuell eingegebener Messwert
```

```
end
handles.m.String=num2str(m); % Konvertierung des Messwertes in eine
Zeichenkette
f=450; % gemessener Abstand bei Probe im Fokus
m=m-f; % Nullung des Messsystems
z=m; % Übergabe des genullten Messwertes zur Achsensteuerung
zAnf=z; % Übergabe des genullten Messwertes zur Konvertierung in eine
Zeichenkette
handles.zAnf.String=num2str(zAnf); % Konvertierung des genullten
Messwertes in eine Zeichenkette
% Erhöhung des z-Wertes bei geringen Abständen
a=0; % Zählvariable 100 µm nach oben
b=0; % Zählvariable 100 µm nach unten
while z<-0.05
    z=z+0.1;
    a=a+1;
end
% Verringerung des z-Wertes bei geringen Abständen
while z>0.05
    z=z-0.1;
    b=b+1;
end
zEnd=z; % Übergabe der eingestellten Position zur Konvertierung in
eine Zeichenkette
handles.zEnd.String=num2str(zEnd); % Konvertierung der eingestellten
Position in eine Zeichenkette
% Konvertierung der Zählvariablen
handles.a.String=num2str(a);
handles.b.String=num2str(b);
end
end
```

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Daniel Sella: Forschungsbericht_Sella, Forschungsbericht, Chemnitz. Mittweida, 2017
- [2] <http://www.laser-entfernungsmesser.org/funktionsweise-laser-entfernungsmesser.html>, verfügbar am 6.10.2016 um 15:29
- [3] <http://www.laserentfernungsmesser-tests.de/die-funktionsweise-eines-laser-entfernungsmesser/>, verfügbar am 21.10.2016 um 09:00
- [4] https://www.heraeus.com/de/group/press_group/corporate_news/2016/page_25.aspx, verfügbar am 21.10.2016 um 09:18
- [5] <http://laserautofokus.de/>, verfügbar am 21.10.2016 um 13:49
- [6] Optoprim Germany GmbH: Autofokus für Lasersysteme zum Markieren, Schweißen, Bohren und Schneiden unter Verwendung von Optimet Abstandssensoren, Puchheim, Laser-Magazin, 2017
- [7] Poprawe, Reinhart: Lasertechnik für die Fertigung, Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Berlin. Heidelberg, Springer, 2005
- [8] Bednara. Höfler. Nowak. Wölfelschneider: Lichtlaufzeitverfahren / Time-of-Flight, Freiburg. Erlangen, Fraunhofer Verlag, 2014
- [9] F. Pedrotti. L. Pedrotti. W. Bausch. H. Schmidt: Optik für Ingenieure, Grundlagen, Berlin. Heidelberg, Springer, 2005, 3. Auflage
- [10] <http://www.piart-plus.de/foto/vorles/cbca.htm>, verfügbar am 21.04.2017 um 08:33
- [11] Steffen Müller: Fügetechnologien für den Karosserie-Leichtbau, Präsentation, Neckarsulm, 2015
- [12] Parthier, Rainer: Messtechnik, Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure, Wiesbaden, Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2006, 3. Auflage

-
- [13] <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/hysteresse/7078>, verfügbar am 08.09.2017 um 10:17
- [14] <http://www.deprag.com/schraubtechnik/technische-informationen/statistische-grundlagen.html>, verfügbar am 08.09.2017 um 10:23
- [15] <http://www.micro-epsilon.de/service/glossar/>, verfügbar am 19.05.2017 um 08:38
- [16] Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH: Laser: Jede Aufgabe perfekt lösen, Prospekt, Ditzingen, 2011
- [17] Trumpf Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG: Laserbearbeitung, Festkörperlaser, Technische Dokumentation, Ditzingen, 2007
- [18] Trumpf Laser GmbH: D70, Betriebsanleitung, Schramberg, 2016
- [19] https://www.bueromarkt-ag.de/laser_entfernungsmesser.html, verfügbar am 17.11.2016 um 15:10
- [20] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG: Lasertriangulation: Von Punkt bis Linie, Fachartikel, Ortenburg, 2017
- [21] <http://www.sensoren.eu/laser-distanz-sensor-las-t5-triangulation.html>, verfügbar am 13.04.2017 um 09:12
- [22] Baumer Group: MESAX 70 multi-spot, Bedienungsanleitung, Frauenfeld, 2016
- [23] <http://www.waycon.de/produkte/lasersensoren/>, verfügbar am 13.04.2017 um 10:04
- [24] http://www.micro-epsilon.de/download/products/_laser-sensor/dax--optoNCDT-1420--de.html, verfügbar am 13.04.2017 um 14:15
- [25] <http://www.renishaw.de/de/xl-80-laserinterferometersystem--8268>, verfügbar am 06.07.2017 um 09:32
- [26] <http://www.clasohlson.com/de/Multimeter-mit-USB-UT61D/36-4717?gclid=CJrdrunGINQCFQ46GwodZqMPrw>, verfügbar am 29.05.2017 um 09:14

-
- [27] <https://ht-instruments.de/produkte/multimeter/ironmeter/>, verfügbar am 26.06.2017 um 08:15
- [28] https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/multimeter-trms-multimeter-pce-instruments-multimeter-pce-em-886-det_22571.htm, verfügbar am 26.06.2017 um 08:33
- [29] Wenglor sensoric GmbH: High-Performance-Distanzsensor, OY1P303P0102, LASER, Datenblatt, Tettnang, 2015
- [30] Balluff GmbH: Optoelektronische Sensoren, BOD 23K-LA01-S92, Datenblatt, Neuhausen, 2017
- [31] Leuze electronic GmbH + Co. KG: ODKL 96B, Optische Laser-Distanzsensoren, Datenblatt, Owen, 2013
- [32] Leuze electronic GmbH + Co. KG: ODSIL 96B, Optische Laser-Distanzsensoren, Datenblatt, Owen, 2015
- [33] Baumer Group: Distanzsensoren, OM70-11112069, Datenblatt, Frauenfeld, 2014
- [34] <http://www.design-in-sachsen.de/einreichungen/23.html>, verfügbar am 18.04.2017 um 08:49
- [35] <https://www.controlcomponentsinc.com/la01-balluff-photoelectric-distance-sensor-p-4175-l-en.html>, verfügbar am 07.08.2017 um 13:59
- [36] Leuze electronic GmbH + Co. KG: ODS... 9 / OD... 96B, Optische Abstands-sensoren, Technische Beschreibung, Owen, 2014

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, den 07.12.2017

Daniel Sella